

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2022. 07. 007

# 长距离重力流输水管线末端关阀水锤分析及防护

李建宇, 魏举旺

(中国铁路设计集团有限公司 机械动力与环境工程设计研究院, 天津 300308)

**摘要:** 长距离输水管线的一次性投资大,且管网重要程度高,做好水锤防护关系到用水的安全与稳定。以援非某重力流输水工程为例,管网全长57.6 km,地势两边高、中间低,且起伏较大,水锤削减存在较大难度。在确定管道最大允许承受压力、关阀时间、关阀方式后,针对危害较大的末端关阀水锤,通过布置进气阀、排气阀、调压塔、超压泄压阀等系列组合防护措施进行软件模拟与分析。结果表明:进气阀、排气阀的传统快进慢排布置并不具备普适性,应根据工程实际情况合理选择布置方法;进气阀、排气阀搭配调压塔能有效消除负压及断流弥合水锤引起的正压,进一步搭配超压泄压阀,可将水锤带来的危害降至管道承受范围内,为输水管线的安全运行提供保障。

**关键词:** 长距离输水管线; 重力流; 关阀水锤; 调压塔

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)07-0051-05

## Analysis of Valve Closing Water Hammer at the End of Long-distance Gravity Flow Water Transmission Pipeline and Its Protection

LI Jian-yu, WEI Ju-wang

(Design and Research Institute of Mechanical Power and Environmental Engineering, China  
Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** For long-distance water transmission pipeline with large one-time investment and great importance, its water hammer protection measures are critical to the safety and stability of water supply. The length of a gravity flow water transmission project in Africa is 57.6 km, its terrain is high on both sides and low in the middle, which makes it difficult to reduce the water hammer. After determining the maximum allowable pressure, valve closing time and valve closing mode of the pipeline, a series of combined protective measures such as inlet valve, exhaust valve, surge tower and overpressure decompression valve were adopted to simulate and analyze the harmful water hammer caused by valve closing at the end of the pipeline. The results showed that, the traditional fast forward and slow exhaust arrangement of the inlet valve and exhaust valve was not universal, so the arrangement method should be reasonably selected according to the actual situation of the project. The combination of inlet valve, exhaust valve and surge tower could effectively eliminate the negative pressure and positive pressure caused by water hammer of cavities collapsing. When they were further combined with overpressure decompression valve, the harm caused by water hammer could be reduced to the bearing range of the pipeline, so as to guarantee the safe operation of the water transmission network.

**Key words:** long-distance water transmission pipeline; gravity flow; valve closing water hammer; surge tower

## 1 工程概况

本工程源于非洲某城市供水项目,管网设计规模  $Q=14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,水源接自上游郊区高位水池,通过长达 57.6 km 的输水管网引至下游该城市水厂蓄水池。起点标高为 336 m,末端标高为 189 m,全程重力流供水。地势两侧高、中间低,最低点标高为 68 m,距离起端落差高达 268 m。系统概况如图 1、2 所示。

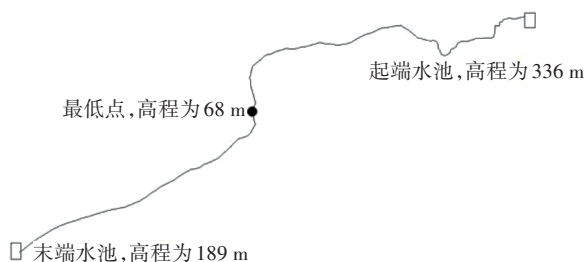


图1 工程输水管网概况

Fig.1 Layout of pipeline

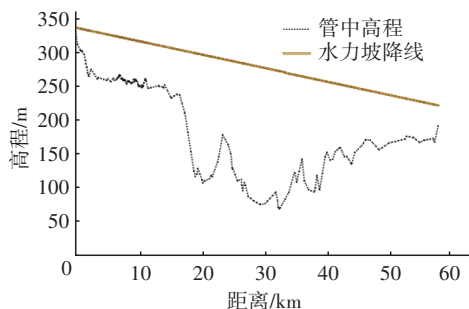


图2 管线纵剖面

Fig.2 Vertical profile of water transmission pipeline

从图2可以看出,20~35 km 区间地势相对较低,管道正常输水过程中,该区间管道工作压力最高可达 204 m 水柱(1 m 水柱产生的压力约为 10 kPa,下同),一旦发生水锤,管道压力急剧上升,爆管风险异常严重;且该项目位于西非,经济欠发达,运营管理水平相对低下,增加了水锤发生概率。因此,设计出运行可靠、能够有效防护水锤危害的输水系统是研究重点<sup>[1]</sup>。

## 2 工程模型求解方法

该工程采用特征线法<sup>[2]</sup>求解,差分方程如下:

$$Q_T = C_T - C_a H_T \quad (1)$$

$$Q_T = C_n + C_a H_T \quad (2)$$

$$C_T = Q_{L1} + C_a H_{L1} - C_f Q_{L1} |Q_{L1}| \quad (3)$$

$$C_n = Q_{L2} + C_a H_{L2} - C_f Q_{L2} |Q_{L2}| \quad (4)$$

$$C_a = \frac{gA}{a} \quad (5)$$

$$C_f = \frac{F\Delta t}{2DA} \quad (6)$$

式中:  $Q_T$ 、 $H_T$  分别为管道在求解位置的瞬态流量和瞬态水头;  $Q_{L1}$ 、 $Q_{L2}$  分别为管道 L1、L2 两点的瞬态流量;  $H_{L1}$ 、 $H_{L2}$  分别为管道 L1、L2 两点的瞬态水头;  $C_a$  为管道的特征常数;  $C_f$  为管道的摩阻性常数;  $C_T$ 、 $C_n$  分别为水锤特征方程的特征参量;  $g$  为重力加速度;  $a$  为水锤波速;  $F$  为管道的阻力系数;  $\Delta t$  为时间步长;  $D$  为管道直径;  $A$  为管道过流面积。

## 3 工程模型分析

### 3.1 模拟边界条件

管道两侧均为水池,假定水锤发生过程中水池液位不变,供水管网全程采用单根 DN1 200 的 K9 球墨铸铁管,壁厚为 15.3 mm,海森威廉系数为 130,管道流速为 1.8 m/s,水锤波速为 1 041 m/s。管道工作压力最大为 204 m 水柱,根据《给水排水设计手册》(第 3 册)的规定,管道允许承压不应超过运行压力的 30%~50%,该工程全部按照 1.3 倍工作压力为目标进行校核,即发生水锤时管道承压不超过 265.2 m 水柱(204 m × 1.3)。

经模拟,该工程始端关阀不会引发灾难性水锤,主要研究末端关阀水锤。管道全长为 57.6 km,末端工作压力为 31 m,在无视管阻的前提下,计算得知关阀时间小于 50.9 s 时发生直接水锤,直接水锤在工程中是要避免的,因此关阀时间不应该小于该值。水锤会随着关阀时间的延长而递减,为了模拟水锤危害较大的情况,该工程将关阀时间定为 60 s。通过计算  $\rho\tau_0 > 1.5$ ,因此容易发生极限水锤<sup>[3]</sup>,可以采取先快后慢的关阀方式以降低极限水锤压力。通过多次模拟,最终确定前 1/3 关阀时间内关闭 70%、后 2/3 关阀时间内关闭 30% 作为通用的关阀操作方式。

水锤模拟时长为 600 s、步长为 0.5 s,20~35 km 里程作为水锤压力的控制区间。

### 3.2 无防护措施的水锤分析

经模拟,末端60 s关阀会产生较为剧烈的水锤波动,10 km之后的最高压力包络线维持在500 m水柱左右,20~35 km区间的管道承压高达444 m水柱,远远超过265.2 m水柱的目标压力值;在6~12 km区间,管道最低压力包络线多处位于管中高程线之下,该负压区间引发了严重的断流弥合水锤,产生高达52.7 m<sup>3</sup>的气穴空腔。

水锤模拟效果见图3。

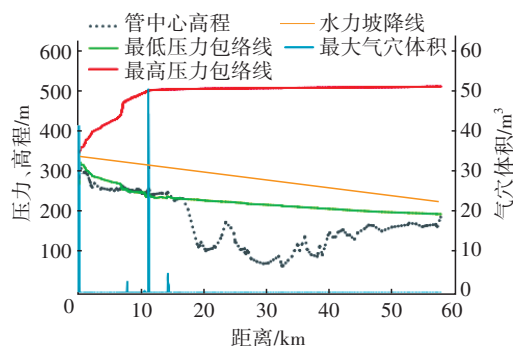
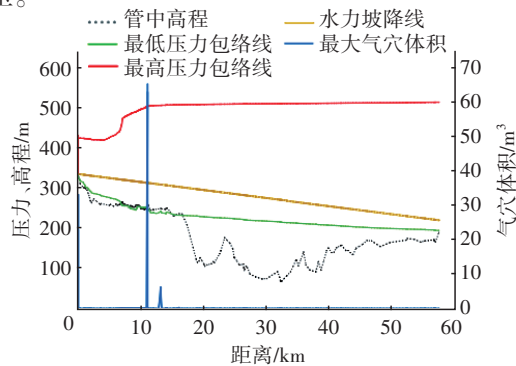


图3 60 s关阀水锤模拟

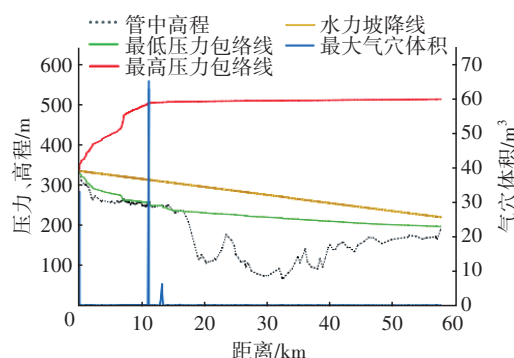
Fig.3 Water hammer simulation with valve closing time of 60 seconds

### 3.3 添加进气阀、排气阀的水锤分析

针对图3模拟结果,当务之急是消除6~12 km区间的管道负压,在此区间每隔1 km布置1个复合式排气阀,当水流断裂时需要快速补气,水流弥合时需要缓慢排气,防止断流空腔弥合水锤的二次产生<sup>[4]</sup>。按照常规思路采用快进缓排<sup>[5]</sup>的方式,首先将进气口口径设置为100 mm,排气口口径设置为20 mm。模拟结果见图4(a)。可以看出,负压稍有减缓,管道压力振荡情况减轻,但是该工程地势起伏大,20 km处地势陡降,断流在弥合过程中需要爬升,难度较大,排气相对困难,反而不利于消除正压。



a. 排气口径为20 mm



b. 排气口径为100 mm

图4 设置进气阀、排气阀的水锤模拟

Fig.4 Water hammer simulation with inlet and exhaust valve

本研究再次将排气口口径由20 mm调整为100 mm,模拟结果见图4(b)。可知,当将排气口调大后,排气速度得到提升,管道始端的正压得到一定程度的缓解,但是受限于该工程地形情况,后续负压及正压均无明显改善,仅靠安装进气阀、排气阀无法将水锤的影响降至可控范围内。

### 3.4 安装单向调压塔的水锤分析

在安装进气阀、排气阀的基础上,在气穴体积最大的节点安装调压塔。因为该工程负压点发生在管线上游,水头较高,且主要危害是负压,双向调压塔高度必须高于正常水头才能达到“正压进水,负压补水”的效果,因此从经济方面考虑选择单向调压塔。单向调压塔的3个参数分别为补水管直径、调压塔直径和水位高度<sup>[6]</sup>,其中补水管直径关系着断流弥合水锤发生时的补水速度,而调压塔直径和水位高度一方面关系着补水体积,另一方面直接关系着工程造价。为确定最合适的调压塔参数,进行了正交试验,见表1。

该工程补水管直径对弥合水锤的削减至关重要,管径如果选取过小则补水不及时,依旧会发生很严重的气穴,但是当补水速度达到一定值时,即使再加大补水管直径,也无法进一步削减弥合水锤;而调压塔的直径对水锤的削减效果呈现出一定程度的波动,随着池体尺寸的加大,弥合水锤迅速削减,2 m后趋于稳定,但当池体尺寸增大到5 m时,始端的气穴量反而加大,到7 m时又回归到稳定值,到10 m时又升高,之后又回归到正常值;对于池体水位高度而言,其关乎着管道的抗冲击能力,越高则弥合水锤的危害越低,当水位高度达到100 m时,管道几乎不会发生任何负压,水锤危害大大降低,

管内压力波动十分平缓,但是池体高度关系着工程造价,综合考虑经济性及功能性,选择在12 km处安装1个直径为3 m、高为6 m、补水管管径为0.50 m的单向调压塔。

表1 调压塔参数正交试验

Tab.1 Orthogonal test of surge tower

补水管直径/m	调压塔直径/m	水位高度/m	中间气穴/L
0.50	5	9	21.8
0.50	5	20	0
0.50	5	3	81.1
0.50	3	6	50
0.50	5	1	100
0.50	7	3	80
0.50	7	6	50
0.50	5	6	50
0.20	5	6	1 300
0.05	5	6	7 000
1.00	7	6	50
1.00	5	6	50
1.00	3	6	50
1.00	10	6	50
1.00	30	6	50
0.50	20	6	50
0.50	1	6	6 322
0.50	2	6	50
0.50	1.5	6	974

安装调压塔后的水锤模拟结果见图5。

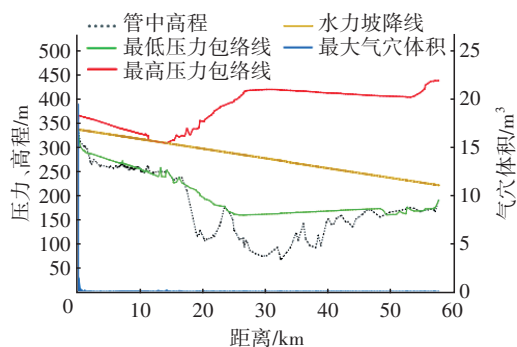


图5 设置调压塔的水锤模拟

Fig.5 Water hammer simulation with surge tower

从图5可以看出,增加单向调压塔后,与排气阀结合,对负压和空气产生量有很大的影响。除始端外,位于12 km附近的中间气穴几乎被全部消除,整个管道的最低压力包络线基本抬升至管道埋深线上方。此外,由于削减了负压产生的断流弥合水锤,最高压力包络线较未安装调压塔之前有了很大改善。单向调压塔配合进气阀、排气阀,对管道水锤的消除具有很显著的效果。

### 3.5 安装超压泄压阀的水锤分析

在安装单向调压塔之后,发现负压的问题已经解决,但在管道中部仍存在正压超压的情况,引入1条最大允许压力线(最大允许压力线=管中高程+265.2)与最高压力包络线进行比照(见图6),此时可采用超压泄压阀解决。超压泄压阀的工作主要依赖于对泄压阀滑塞内腔的压力控制,正常输送时,滑塞在内腔设定压力作用下紧紧地与主阀座贴合,使泄压阀处于正常关闭状态,当管线发生水击而异常升压,超过其滑塞内腔所设定的安全控制压力时,在压差的作用下滑塞打开,通过滑塞外腔开始泄压,当管线压力恢复正常工作压力时,滑塞与阀座紧紧贴合,恢复关闭状态,停止泄放,管线恢复正常输送。

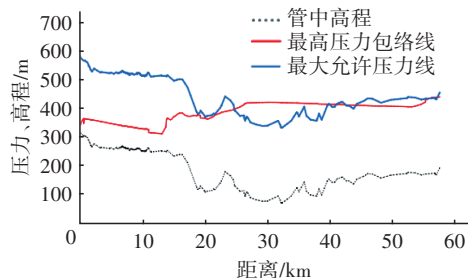


图6 压力比对

Fig.6 Pressure comparison

超压泄压阀在开启释放压力的同时,管道中的水会随之排出,因此阀门压力不宜设置过低,也不宜设置在多处,应作为最后的调压手段选取,该工程在压力最高的28 km处安装超压泄压阀,设定当工作压力超过265.2 m水柱时阀门自动开启进行泄压,模拟结果如图7所示。

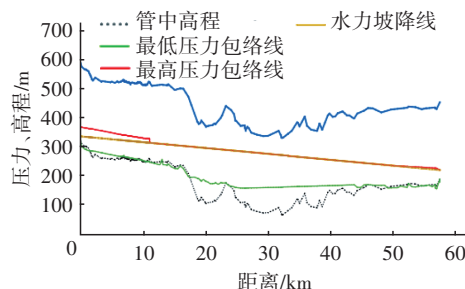


图7 设置超压泄压阀的水锤模拟

Fig.7 Water hammer simulation with overpressure decompression valve

至此,该工程57.6 km的水锤削减完成,除影响不大的起端外,水锤产生的负压基本消除,全局的正压也稳定在管道最大允许压力线之下。



#### 4 结论及建议

以援非某城市供水项目重力输水管线为例,进行水锤削减模拟。该工程因两端高、中间低,地势起伏剧烈,关阀时存在较为严重的水锤风险,需采取一系列递进的水锤防护措施,才能实现削减目标,具有一定的参考意义。

① 两端高、中间低的U形输水管道进气阀、排气阀设置模式采用“快进快排”较传统的“快进慢排”效果更好,在其他工程的水锤削减过程中,应结合具体的地形条件进行分析,得到最适合的进气阀和排气阀尺寸。

② 调压塔的参数选取应兼顾经济性与功能性,可通过正交试验分析来确定“性价比”最优的区间。

③ 超压泄压阀需搭配其他的水锤削减措施一同设计,作为水锤防护的最后保障进行使用。

#### 参考文献:

- [1] 王祺武,李志鹏,朱慈东,等. 基于双阀调节的重力流管路水锤控制分析[J]. 中国给水排水,2020,36(9):52-58.  
WANG Qiwu, LI Zhipeng, ZHU Cidong, *et al.* Water hammer control in gravity flow pipeline based on double-valve regulation[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(9): 52-58 (in Chinese).
- [2] ZHU Z J. Quasi-characteristic method for KDV-Burgers equations [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis of Science and Technology of China, 2004, 27(4): 8-12.
- [3] 金锥,姜乃昌,汪兴华. 停泵水锤及其防护[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2004.

JIN Zhui, JIANG Naichang, WANG Xinghua. Pump-stopping Water Hammer and Its Protection [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004 (in Chinese).

- [4] 徐放,李志鹏,王荣辉,等. 空气阀口径对有压管道停泵水锤的防护研究[J]. 中国给水排水,2020,36(5): 52-55.  
XU Fang, LI Zhipeng, WANG Ronghui, *et al.* Influence of air valve diameter on protection of water hammer caused by pump-stop in pressurized pipelines[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(5): 52-55 (in Chinese).
- [5] 王彦祥,颜炳魁,田颖玲,等. 长距离输水管线停泵水锤分析及防护[J]. 中国给水排水,2019,35(7): 57-61.  
WANG Yanxiang, YAN Bingkui, TIAN Yingling, *et al.* Analysis and protection of water hammer for pump stopping in long distance water conveyance pipeline [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(7): 57-61 (in Chinese).
- [6] 王正昱. 长距离输水工程中单向塔高度设置方案分析[J]. 水利科技与经济,2011,17(4):15-17,25.  
WANG Zhengyu. Analysis of the design scheme for the height of one-way surge tank in long-distance water supply project [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2011, 17(4): 15-17, 25 (in Chinese).

作者简介:李建宇(1994- ),男,山东德州人,硕士,工程师,从事铁路、市政给排水管网设计工作。

E-mail:545889040@qq.com

收稿日期:2021-06-16

修回日期:2021-08-19

(编辑:任莹莹)

借自然之力,护绿水青山