

# 长距离输水管线停泵水锤分析及防护

王彦祥<sup>1</sup>, 颜炳魁<sup>2</sup>, 田颖玲<sup>3</sup>, 何 琴<sup>4</sup>

(1. 成都市市政工程设计研究院, 四川 成都 610023; 2. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300392;  
3. Bentley 软件 <北京>有限公司, 北京 100025; 4. 西华师范大学 环境科学与工程学院, 四川  
南充 637009)

**摘 要:** 对于采用压力流的长距离输水管线, 水锤防护措施对于保障管网稳定运行至关重要。以海南省某典型“长距离、大流量、低扬程”输水工程为例, 借助水锤模拟软件, 研究了因断电导致停泵时不同水锤防护措施对输水管网的影响。该项目输水管线有明显的高点, 存在多处“驼峰”“鱼背”“膝部”, 停泵后容易形成负压并发生断流空腔弥合水锤。通过软件模拟, 调整工程设计, 优化排气阀门类型及布置点位, 能避免发生弥合水锤。对于该类型输水管线, 泵出口设置两阶段关闭液控缓闭蝶阀意义不大, 关键点位设置注气微排阀则能有效控制管网压力, 进而保护管道。

**关键词:** 长距离输水管线; 弥合水锤; 注气微排阀; 停泵

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)07-0057-05

## Analysis and Protection of Water Hammer for Pump Stopping in Long Distance Water Conveyance Pipeline

WANG Yan-xiang<sup>1</sup>, YAN Bing-kui<sup>2</sup>, TIAN Ying-ling<sup>3</sup>, HE Qin<sup>4</sup>

(1. Chengdu Municipal Engineering Design and Research Institute, Chengdu 610023, China; 2. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300392, China; 3. Bentley Systems <Beijing> Co. Ltd., Beijing 100025, China; 4. College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637009, China)

**Abstract:** For long distance water conveyance pipeline with pressure flow, the water hammer protection measures are critical to ensure the stable operation of the pipe network. Take a typical “long distance, large discharge and low lift” water conveyance project in Hainan Province as an example, with the help of water hammer simulation software, the influence of different water hammer protection measures on the water distribution network caused by power failure was studied. The project had high points along the pipeline. With many “humps”, “fish backs” and “knees”, it was easy to form negative pressure and water hammer of cavities collapsing after pump stopped. Software simulation showed that, adjusting engineering design and optimizing valve type and layout point could reduce the possibility of water hammer. For this type of water conveyance pipeline, it was meaningless to close liquid control slow closing butterfly valves in two stages at pump outlet. Setting gas injection micro-drain valves at key points could effectively control the pipe network pressure, and then protect pipeline.

**Key words:** long distance water conveyance pipeline; water hammer of cavities collapsing; gas

injection micro-drain valve; pump stopping

长距离输水工程的主要特点是管线长、投资高,供水的安全可靠性至关重要。采取科学有效的停泵水锤防护措施,对确保长距离输水工程安全运行意义重大。由于海南电网仅通过一条 500 kV 海底电缆与南方电网主网联络<sup>[1]</sup>,在特殊情况如极端天气下极有可能出现联络中断、孤网运行的情况<sup>[2]</sup>。以海南省三亚市海榆东线原水输水改造工程为例,使用 Bentley HAMMER V8i 水锤模拟软件,分析断电工况下的输水管线运行状态,对不同的水锤防护措施进行优选,得到适用于该工程最安全可靠的停泵水锤综合防护措施。该工程属于新建的多起伏长距离输水管线,原水输水工程从赤水水库引水,经一级加压泵站泵送至青田水厂,设计输水量为  $27.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。管线全程为 19.5 km,采用双排 DN1 400 管道埋地敷设。泵站设置 6 台水泵机组(4 用 2 备),额定流量为  $3.18 \text{ m}^3/\text{s}$ ,水泵出口处均安装止回阀。

### 1 停泵水锤数值模拟边界条件

管道首末两端都是水池,假定停泵水锤发生过程中水池液位保持不变。管线布置见图 1,管线纵断面见图 2。

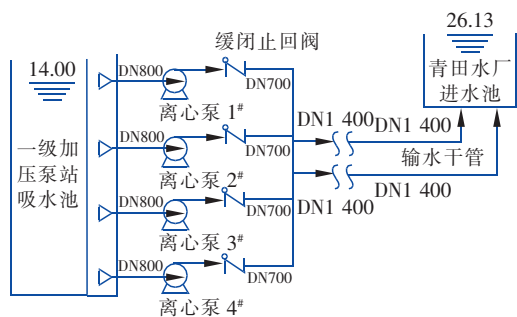


图1 管线布置

Fig. 1 Layout of pipeline

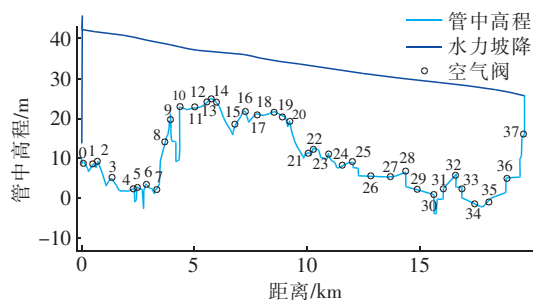


图2 管线纵断面

Fig. 2 Vertical profile of pipeline

由图 2 可知,受地形地貌影响,管线布置有明显的高点并且存在“驼峰”“鱼背”“膝部”等容易发生断流空腔弥合水锤的点,属于典型的“长距离、大流量、低扬程”输水工程。管线末端为青田水厂进水池,输水管线最高点为 13(管中高程为 25.06 m),根据稳态运行水力坡降线,为防止发生停泵水锤时管线内水倒流回泵站,导致管线高点形成很长的空腔,不利于重新启泵输水,在管网起端设置止回阀,末端不设置。根据管网高程及周边地形地貌,沿线设置 38 组空气阀门,布置位置及编号见图 2。

水泵参数:额定流量  $Q_n$  为  $0.796 \text{ m}^3/\text{s}$ 、额定扬程  $H_n$  为 32 m、额定效率  $\eta_n$  为 89.5%、水泵机组的总转动惯量  $J_{\text{机组}}$  为  $24.678 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、比转速  $N_s$  为 64、额定转速为 980 r/min、轴功率为 314 kW、安装高程  $H$  为 8.80 m、泵出口阀门直径为 700 mm。泵站及管路设计参数:泵站设计流量为  $3.18 \text{ m}^3/\text{s}$ 、泵站吸水池设计水位为 14.00 m、青田水厂进水池设计水位为 26.13 m、管中高程最高点为 25.06 m。

输水管材参数如下:预应力钢套筒管(PCCP)的管内径为 1 400 mm、壁厚为 125 mm、水锤波速  $a$  为 998.80 m/s、海曾-威廉系数  $C_h$  为 145、粗糙系数  $n$  为 0.012 5、运行压力为 0.6 MPa;顶进式施工法用钢筒混凝土管(JCCP)的管内径为 1 400 mm、壁厚为 140 mm、水锤波速  $a$  为 1 029.30 m/s、海曾-威廉系数  $C_h$  为 145、粗糙系数  $n$  为 0.012 5、运行压力为 0.6 MPa;给水涂塑复合钢管(I)的管内径为 1 400 mm、壁厚为 12 mm、水锤波速  $a$  为 1 016.42 m/s、海曾-威廉系数  $C_h$  为 140、粗糙系数  $n$  为 0.013、运行压力为 0.6 MPa;给水涂塑复合钢管(II)的管内径为 800 mm、壁厚为 7 mm、水锤波速  $a$  为 1 021.95 m/s、海曾-威廉系数  $C_h$  为 140、粗糙系数  $n$  为 0.013、运行压力为 1.0 MPa;给水涂塑复合钢管(III)的管内径为 700 mm、壁厚为 7 mm、水锤波速  $a$  为 1 057.13 m/s、海曾-威廉系数  $C_h$  为 140、粗糙系数  $n$  为 0.013、运行压力为 1.0 MPa。

## 2 数据与分析

时间步长设为 0.013 97 s,模拟时间共计 300 s。

### 2.1 仅设置排气阀的水锤分析

空气阀门均采用 DN150 排气阀,管线一级加压泵站在断电导致停泵且各泵组出口水力控制阀拒动

时,分别验证水泵出口处设置止回阀和不设置止回阀的工况。当管线仅设置排气阀时,排气阀仅在管线充水排气时动作,冲水完成后,无论管道内气体存在与否均不再开启。模拟结果表明,泵出口不论设置止回阀与否,管线的负压均超过 $-2\text{ m}$ ( $1\text{ m}$ 水柱产生的压力约为 $9.8\text{ kPa}$ ,下同),正压超过管网运行压力的 $1.5$ 倍,当发生停泵水锤时,容易出现爆管或者管道抽瘪的状况(见图3)。

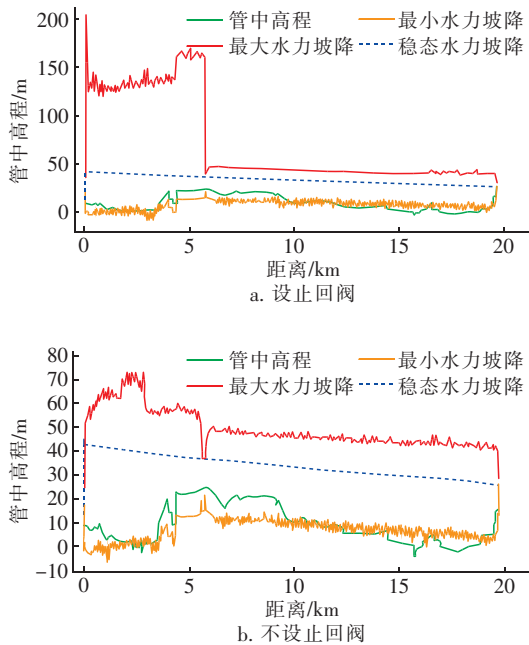


图3 仅设置排气阀时管线水力包络线

Fig. 3 Hydraulic envelope of pipeline only with exhaust valve installed

从图2可以看出,空气阀 $9\sim 10$ 之间高差较大,因事故停泵引起的压力振荡过程将导致整个泵管系统发生剧烈的水锤,管道全线压力先降低,导致多处高点液柱分离并形成断流空腔,随后受反射增压波作用将产生具有很大破坏性的断流空腔弥合水锤。可以看出,对于起伏较大的输水管路,仅设置排气阀是不够的,需要进气和排气结合,在管网出现负压时快速进气来破坏真空。

## 2.2 仅设置DN150进排气阀的水锤分析

将管线上的排气阀全部更换为复合式高速进排气阀,口径均为DN150。分别对设置止回阀和不设置止回阀的工况进行模拟。结果表明,采取进、排气措施后,水锤产生的正压明显降低,但是仍有断流弥合水锤存在,负压较大,对于管网的稳定运行不利。对于该工况下停泵水锤模拟结果,分析认为,选取的

复合式进排气阀的进气量满足需求,但排气过快,导致维持管道压力的气体被快速排出,最后导致发生断流空腔弥合水锤,局部点位的复合式进排气阀没有起到保护作用,反而加剧了水锤的发生。对于该情况,提出了注气微排阀的方案。

## 2.3 设置进排气阀+注气微排阀的水锤分析

注气微排阀在管道处于负压状态下大量进气、正压状态下微量排气,有效提高管道内的压力,防止断流弥合水锤的发生。注气微排阀具有在不同压力下自动转换孔口的功能,不能以“真空破坏阀+排气阀”的组合方式替代。微量排气的方式一方面阻止了断流弥合水锤的发生,另一方面,如果其排气口径较小,管网重启时可能存在无法快速排出水中气体的特点。同时,由于注气微排阀较复合式排气阀费用高,所有的空气阀全部采用注气微排阀并不经济,因此选取合适的点位和口径较为关键。经过反复的技术和经济比选,确定了注气微排阀的位置,分别为 $1\sim 2, 9\sim 14, 18\sim 19$ 。复合式高速进排气阀进出气口径均为DN150,注气微排阀的进气口径为DN150、出气口径为 $12.7\text{ mm}$ 。模拟结果见图4。可以看出,采用进排气阀+注气微排阀的方案有效控制了水压的波动,停泵水锤正压与管网的稳压水头相吻合,负压控制在 $-2\text{ m}$ 范围内,符合工程预期。

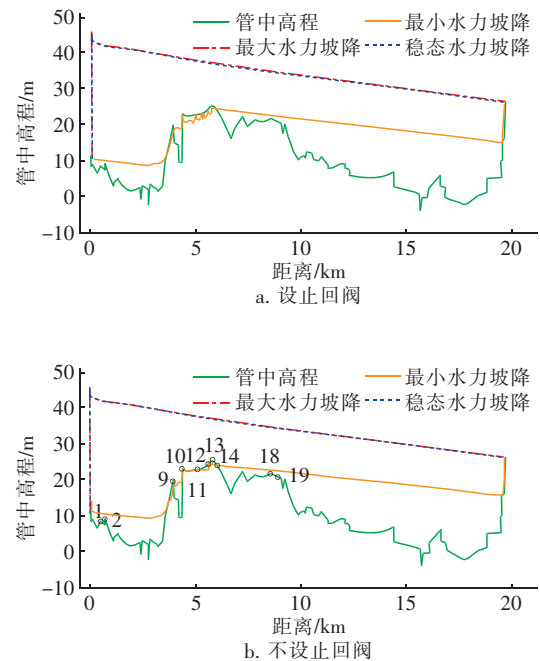


图4 设置进排气阀+注气微排阀时管线水力包络线

Fig. 4 Hydraulic envelope of pipeline with inlet-exhaust valve + injection micro-drain valve

从图4还可知,当结合使用注气微排阀与进排气阀门时,采用止回阀与否对停泵水锤的影响不大。同时,较大的出气口径有利于管线正常运行时排气,因而经过综合比选,确定DN150复合式高速进排气阀+DN150-12.7注气微排阀方案作为本工程停泵水锤的防护措施。

### 3 模型复核

本工程水锤计算以设计工况点为依据,由于水温及水质会影响水中气体含量进而影响水锤波速,同时蝶阀出口处的压力同水锤波速之间并非呈线性关系<sup>[3]</sup>,故模型复核可采用 $1/2a$ 的方案<sup>[4]</sup>。

根据水锤工况进行模拟,确定DN150进排气阀与DN150-12.7注气微排阀组合为优选水锤防护方案,本工程在波速分别为450、1200 m/s工况下对模型进行复核,结果分别见图5、6。

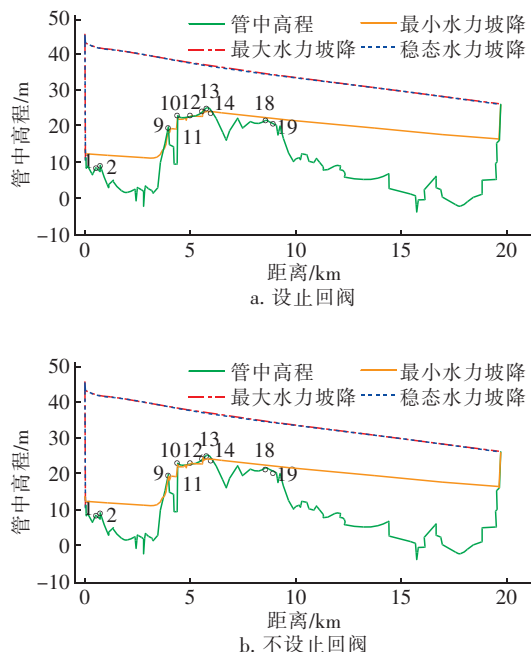


图5 水锤波速 $a$ 为450 m/s时模型复核结果

Fig.5 Model check results with water hammer wave velocity of 450 m/s

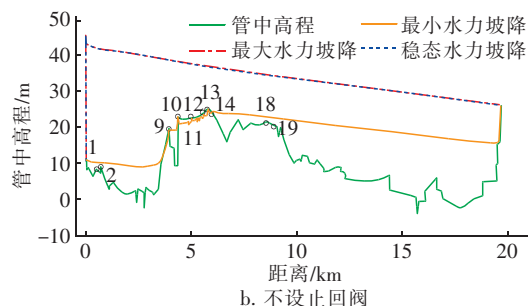
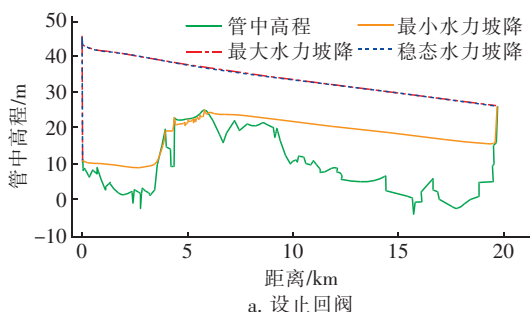


图6 水锤波速 $a$ 为1200 m/s时模型复核结果

Fig.6 Model check results with water hammer wave velocity of 1200 m/s

由图5可知,无论是否设止回阀,在水锤波速较低的情况下,本工程选用的水锤防护措施仍然有效。

由图6可知,水锤波速 $a$ 为1200 m/s时,无论是否设置止回阀,正负压均在理想范围内。通过模型复核可以看出,优选后的水锤防护方案较为合理。

结合该工程的水锤模拟结果可以看出,当采取了合适的水锤防护措施后,水泵出口设置止回阀与否对于水锤防护影响不大,但不设止回阀容易导致水泵倒转,同时管线排空,对泵站的运行维护和管线充水不利,因而在泵出口设置止回阀。

对于“长距离、大流量、低扬程”的输水工程,断电停泵容易引起负压,两阶段液控缓闭蝶阀主要应用于高扬程、大流量、小摩阻损失、水锤升压较大的泵站系统,两阶段关闭液控缓闭蝶阀对于本项目意义不大。停泵水锤面临的主要问题在于负压引起的断流空腔弥合水锤。文献[4]也指出,装设于水泵出口的任何两阶段关闭液控缓闭蝶阀,对于管路系统中的水柱分离现象均无防止作用。

### 4 结论及建议

① 对于容易产生负压并形成断流空腔弥合水锤的输水管路,泵出口设置两阶段关闭液控缓闭蝶阀的意义不大。

② 空气阀门的口径及位置对于长距离输水管线的水锤防护至关重要,宜结合水锤模拟结果进行布置。

③ 水锤模型应进行复核,确保水质或水量波动情况下管线仍能正常运行,提高输水保证率。

### 参考文献:

- [1] 林芳强. 海南西部地区电网特殊情况下应急运行方案研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.



Lin Fangqiang. Research on Emergency Operation Program of Western Hainan Region Power Grid under the Special Circumstances[D]. Beijing:North China Electric Power University,2014(in Chinese).

- [2] 唐斯庆,张弥,李建设,等. 海南电网“9·26”大面积停电事故的分析与总结[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):1-7,16.

Tang Siqing, Zhang Mi, Li Jianshe, *et al.* Review of blackout in Hainan on September 26th—Causes and recommendations [J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(1):1-7,16(in Chinese).

- [3] 朱满林. 泵供水系统水锤防护及节能研究[D]. 西安:西安理工大学,2007.

Zhu Manlin. Research on Water Hammer Prevention and Energy Saving of Pumping Water Supply System [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007 (in Chinese).

- [4] 金锥,姜乃昌,汪兴华,等. 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, *et al.* Pump-

stop Water Hammer and Its Protection [M]. 2nd ed. Beijing:China Architecture & Building Press, 2004 (in Chinese).



作者简介:王彦祥(1988—),男,山东潍坊人,硕士,工程师,主要从事长距离输水管线的停泵水锤分析与防护研究。

E-mail:wyxcqu@126.com

收稿日期:2018-08-12

(上接第56页)

根据理论计算数据进行了处理方法可行性验证,同时以某水厂为例,对几种处理方法的运行成本进行了分析,为应用二氧化氯发生器水厂处理残液提供了参考。水厂可根据实际情况,选择合适的处理方法,达到去除二氧化氯及中性排放的目的。

#### 参考文献:

- [1] 倪永浩. 现代二氧化氯制备技术[J]. 陕西科技大学学报,2003,21(3):6-9.

Ni Yonghao. Chlorine dioxide manufacturing processes [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology,2003,21(3):6-9(in Chinese).

- [2] 董文艺,王安娜,吴桂楠,等. 二氧化氯发生器残液处理方法研究与比较[J]. 安全与环境学报,2018,18(2):678-683.

Dong Wenyi, Wang An'na, Wu Guinan, *et al.* Comprehensive comparison of treating methods for residual liquid of chlorine dioxide generator[J]. Journal of Safety and Environment,2018,18(2):678-683(in Chinese).

- [3] 闫云涛,马春元. 二氧化氯制备过程中氯酸盐控制技

术[J]. 净水技术,2018,37(8):56-60.

Yan Yuntao, Ma Chunyuan. Control technology of chlorate in process of preparation of chlorine dioxide[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(8): 56-60 (in Chinese).



作者简介:穆丽(1980—),男,山东济南人,大学本科,总工程师,主要从事水处理设备的开发、设计及应用工作。

E-mail:daduikuaiji@126.com

收稿日期:2018-10-08