

重力流关阀规律及空气阀优化研究

边少康^{1,2}, 张小莹^{1,2}, 李刚³, 李琳^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆伊犁州水利电力勘测设计研究院有限公司, 新疆 伊宁 835100)

摘要: 为有效防护长距离、多起伏、高落差的重力流输水管道, 基于波特特性法对某工程建立了水力过渡过程计算模型, 分析了无防护措施下的关阀规律, 对比了传统普通空气阀和三动式空气阀的防护效果, 探讨了三动式空气阀联合两阶段关阀方案对关阀水锤的影响。结果表明: 在未采取防护措施时, 管道全线最低压力严重超标; 采取三动式空气阀联合两阶段关阀方案后, 输水管道的最低压力水头保持在-2 m 以上; 对于长距离、多起伏、高落差的重力流输水管道, 应首先考虑减轻管道的负压; 采用三动式空气阀联合两阶段关阀方案可以对输水管道和阀前的负压起到很好的控制效果。

关键词: 重力流; 输水管道; 水锤压力; 空气阀; 关阀规律

中图分类号: TV134

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)01-0055-07

Study on valve-closure law of gravity flow and optimization of air valve//BIAN Shaokang^{1,2}, ZHANG Xiaoying^{1,2}, LI Gang³, LI Lin^{1,2} (1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China; 3. Xinjiang Yili State Water Conservancy and Electric Power Survey and Design Institute Co., Ltd., Yining 835100, China)

Abstract: In order to effectively protect long-distance, multi-undulation, and high-fall gravity-flow water pipelines, a hydraulic transition process calculation model was established for an actual project based on the wave characteristic method. The value closure laws without protection measures were analyzed, the protection effects of traditional common air valve and three-action air valve were compared, and the impact of the combination of the three-action air valve and two-stage valve closure on water hammer was investigated. The results show that without protective measures, the minimum pressure along the entire pipeline seriously exceeds the standard. After adopting the combination of the three-action air valve and two-stage valve closure, the minimum pressure head of the water pipeline can be maintained above -2 m. For long-distance, multi-undulation, and high-fall gravity-flow water pipelines, priority should be given to reducing the negative pressure in the pipeline. The use of the combination of the three-action air valve and two-stage valve closure can have a good control effect on the negative pressure in the water pipeline and in front of the valve.

Key words: gravity flow; water pipeline; water hammer pressure; air valve; valve closure rule

为解决水资源分布的地域差异问题并满足人们日益增长的用水需求, 越来越多的大型跨流域输水工程开始兴起^[1-2]。由于重力流输水工程具有节约能源、工程造价低、运行费用低等优点, 使得其在供水工程中占据了一定的比例。对于重力流输水工程, 管道上的阀门关闭会使得管道内的流速发生改变, 从而导致管道内的压力随着流速变化而发生改变, 这种发生非恒定流的过程被称为瞬变流现象^[3]。当阀门快速关闭时, 管道容易产生较大的水锤压力, 如果不采取相应安全措施, 可能会引起输水

管道破裂或压瘪, 造成严重的工程事故^[4]。

在山地较多的地区, 输水工程往往具有地形落差大、起伏多、距离长的特点, 此时输水管道内水力过渡过程较为复杂。高位水库通过重力流方式向下游城镇供水时, 地势较低的输水管道压力较大, 发生水力过渡过程时, 可能会超出管道承压范围。多位学者^[5-10]针对重力流所产生的关阀水锤进行了大量研究, 得出末端阀门的关闭规律对水锤压力有较大影响, 且采取折线关阀规律可降低水锤压力峰值。Zhang 等^[11]对关阀水锤波与泵的动态相互作用进行

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A02003-4)

作者简介: 边少康(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事水电站及泵站水力学研究。E-mail: 2363194711@qq.com

通信作者: 张小莹(1992—), 女, 副教授, 博士, 主要从事水电站及泵站水力学研究。E-mail: 543485711@qq.com

了数值模拟与试验研究,发现阀门关闭产生的水锤波对泵产生了较大的流体诱导力,导致管内压力激增。黄时锋等^[12]对比了一阶段线性关阀和两阶段折线关阀对管道最大、最小水锤压力及泵的反转速度的影响,结果表明合理的两阶段折线关阀可更有效地预防水锤事故。韩凯等^[13]针对停泵后重新启动的时间间隔对管道水锤压力的影响进行了研究,发现较小的时间间隔可减小调压井的尺寸,较大的时间间隔有利于减小管道中的水锤压力。Shi 等^[14]提出了溢流浮筒和调节阀的组合防护方式,并对阀门调节规律进行了敏感性分析,发现该组合防护方式有效降低了溢流浮筒的高度和施工难度。我国西部地区地势的特殊性,导致了长距离输水工程上下游落差大,管道高程因地形高差变化而变化,管道上可能存在多处凸起点,在发生水力过渡过程时易出现负压,形成空穴并产生水柱分离,当空穴两端的水柱迅速弥合碰撞,会产生剧烈的压力波动,对管道工程的正常运行造成严重的影响^[15-19]。空气阀由于结构简单、成本较低、安装方便等优点被广泛应用于长距离输水管道中。Li 等^[20-21]对不同空气阀进排气系数的防护效果进行了研究。高金良等^[22]针对长距离、多起伏、落差较小的管道水锤防护方案进行了研究,发现在管道坡峰处使用空气阀与真空破坏阀进行防护效果最好。

以上研究成果为输水管道工程的水锤防护提供了思路与方法,但已有研究对于管道起伏变化大的输水工程关注较少,且这类工程发生断流弥合水锤的概率较大,因此有必要针对长距离、多起伏、高落差的重力流输水管道工程中的水锤问题进行深入研究。本文基于波特特性法,针对地形起伏变化大,凸起点众多的新疆某长距离输水工程进行水力过渡过程仿真计算,分析了无防护措施下的关阀规律对管道水锤压力的影响,对比了普通空气阀和三动式空气阀的防护效果,可为类似工程的水锤防护提供参考。

1 数学模型

1.1 水锤计算模型

本文采用 KY pipe 软件进行数值模拟研究,该软件采用波特特性法进行数值计算,波特特性法通过跟踪水锤波的发生、传播、反射和干涉,计算各节点不同时间段的瞬态压力值。水锤的基本方程包括连续性方程(式(1))和动量方程(式(2)):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + f(Q) = 0 \quad (2)$$

式中: H 为压力水头; Q 为体积流量; c 为波速; g 为重力加速度; A 为管道横截面积; $f(Q)$ 为管道阻力项,是 Q 的函数; t 为时间; x 为位置坐标。

1.2 空气阀数学模型

使用波特特性法对空气阀进行建模,采用 Wylie 等^[3]提出的数学模型,其模型基于以下4点假设:空气等熵地流入流出阀门;管道内的空气阀符合等温定律,气体和水体温度保持同温;进入管道内的空气滞留在空气阀附近;空气的体积和管道内的液体体积相比很小,管道内的液体表面高度基本保持不变。

流过空气阀的空气质量流量取决于管道外大气的绝对压力 p_0 、绝对温度 T_0 以及管道内的绝对压力 p 和绝对温度 T 。空气阀的进排气分为以亚声速流进空气($0.528p_0 < p < p_0$,式(3))、以临界速度流进空气($p < 0.528p_0$,式(4))、以亚声速流出空气($p_0 < p < p_0/0.528$,式(5))和以临界速度流出空气($p > p_0/0.528$,式(6))4种情况。

$$\dot{m} = C_{in} A_{in} \sqrt{7p_0 \rho_0 [(p/p_0)^{1.4286} - (p/p_0)^{1.7143}]} \quad (3)$$

$$\dot{m} = C_{in} A_{in} (0.686/\sqrt{RT_0}) p_0 \quad (4)$$

$$\dot{m} = C_{out} A_{out} p \sqrt{[7/(RT)] [(p_0/p)^{1.4286} - (p_0/p)^{1.7143}]} \quad (5)$$

$$\dot{m} = C_{out} A_{out} (0.686/\sqrt{RT}) p \quad (6)$$

式中: \dot{m} 为流过空气阀的空气质量流量; C_{in} 、 C_{out} 分别为空气流入、流出的流量系数; A_{in} 、 A_{out} 分别为空气流入、流出的面积; ρ_0 为大气密度; R 为气体系数。

1.3 空气阀边界条件

空气阀的边界条件见图1,其中 D_1 、 D_2 和 D_3 、 D_4 分别为自上、下游传播至空气阀和由空气阀向上、下游传播的水锤波水头, H_1 、 H_3 分别为水锤波到达空气阀前、后所在节点的水头, H_e 为外界环境的水头, Q_1 为水锤波到达前空气阀处的体积流量, Q_2 为水锤波到达后空气阀处的体积流量, Q_1 、 Q_2 为水锤波到达前自空气阀流出的体积流量, Q_3 、 Q_4 为水锤波到达后自空气阀流出的体积流量。

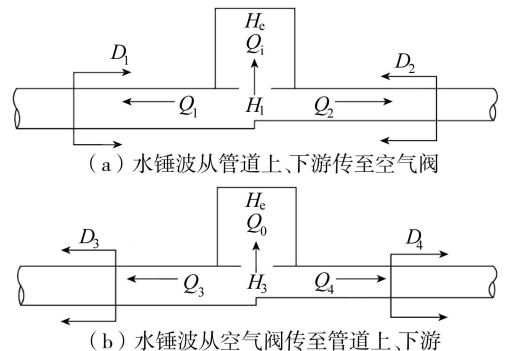


图1 空气阀边界条件

在水锤波到达后管道内水流量为

$$Q_4 = (2D_1 - 2D_2 + F_2Q_2 - F_1Q_0)/(F_1 + F_2) \quad (7)$$

$$Q_3 = -(Q_4 + Q_0) \quad (8)$$

其中 $F_1 = \frac{c_1}{gA_1}$ $F_2 = \frac{c_2}{gA_2}$

式中: c_1, c_2 为空气阀两端管道的水锤波速; A_1, A_2 为空气阀两端管道的横截面积。

由以上公式结合管道流量-压力关系式可分别求得 D_3, D_4 和 H_3 的值。

2 工程概况

工程位于新疆某地区,为长距离有压重力流输水系统。起点为引水隧洞出口稳压水池 A。最高水位 665 m,终点为某市供水点,在桩号 94+700 处设有一调压水池 B,设计水位 585 m。本文选取桩号 0+000 至 94+700 段进行计算分析,管道长度 94 700 m,设计流量 17.1 m³/s,其中桩号 0+000~64+748 段(长度 64 748 m)为管径 3 400 mm 的 PCCP 管。桩号 67+748~94+700 段(长度 26 952 m)为管径 3 200 mm 的 PCCP 管。输水管道中心高程及水力坡度线如图 2 所示。根据 CECS193—2005《城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程》的规定,管道允许承压不应超过最大工作压力的 1.3~1.5 倍,该工程全部按照 1.5 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 121.5 m 水柱,管道最大负压不超过 -2.0 m 水柱。计算得知关阀时间小于 190 s 时发生直接水锤,直接水锤在工程中是要避免的,因此关阀时间不应小于该值。

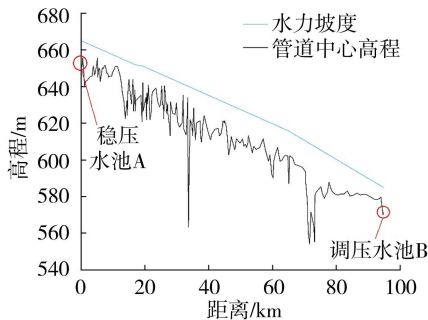


图2 管道中心高程及水力坡度线

3 结果与分析

3.1 末端阀门关闭规律优化

3.1.1 线性关阀

选择不同的线性关阀时间 200、360、520、680、840、1 000 s 进行数值模拟计算,分析关阀时间对管道最大、最小水锤压力的影响。图 3 为不同线性关阀时间下管道沿程最大压力水头包络线。可知管道最大水锤压力发生在阀前处,随着关阀时间的延长,管道最大正压呈先减小后增大的趋势。通过观察管

道负压变化发现,不同线性关阀时间下的管道全线负压水头均为 -10 m,说明延长阀门关闭时间,无法改变管道全线发生汽化的现象。

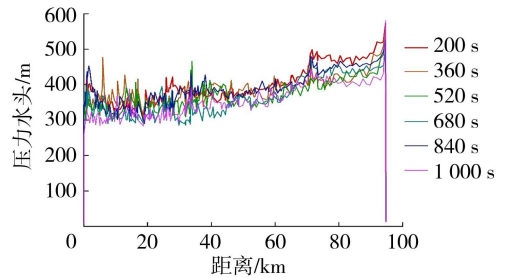


图3 不同线性关阀时间下管道沿程最大压力水头包络线

3.1.2 两阶段关阀

两阶段关阀是将关阀过程分为“快关”和“慢关”两个阶段。鉴于快关段、慢关段的关阀速度以及关阀折点开度有多种组合,本文结合阀门的特性曲线及线性关阀的研究结果,研究了 7 种两阶段关阀方案,各方案管道压力水头极值见表 1。

表1 两阶段关阀方案管道压力水头极值

关阀方案	最大压力水头/m	最小压力水头/m
10-70%-510	594.24	-10
130-70%-630	577.85	-10
250-70%-750	475.19	-10
250-80%-750	480.46	-10
250-75%-750	473.84	-10
250-75%-600	480.82	-10
250-75%-950	486.79	-10

注:关阀方案中 3 组数字分别代表快关时间、关阀折点开度、总关阀时间,例如方案“10-70%-510”代表快关时间 10 s、关阀折点开度 70%、总关阀时间 510 s。

从表 1 可以看出,各方案下最小压力水头均为 -10 m,当关阀折点开度、慢关时间不变时,快关时间从 10 s 增加到 250 s,最大压力水头由 594.24 m 减小到 475.19 m。当关阀折点开度不变时,随着快关时间的延长,最大压力水头减小,这是因为在相同的开度下关阀越快,相同流体受到阻隔的时间就越短,动能转化压能就越多,因此管道总体压力水头升高越快;当快、慢关时间不变,关阀折点开度从 70% 增长为 75% 再升至 80%,最大压力水头从 475.19 m 先降低到 473.84 m 又增大到 480.46 m。由此可知关阀折点开度并不是越大越好或越小越好,存在一个较优的中间值;当快关时间、关阀折点开度不变,慢关时间从 350 s 增加到 500 s 再升至 700 s 时,最大压力水头从 480.82 m 减小到 473.84 m 又增大到 486.79 m。

通过对比发现,线性关阀与两阶段关阀方案下水锤最大正压均远超管道承压值,且全线水锤负压均达到 -10 m 的汽化压力水头。该工程距离长、上下游高差大、线路起伏变化大,结合管道中的压力变化特征,判断水锤升压如此之高以及关阀措施对水

锤压力没有规律性的影响应是管道多处负压过高,出现了蒸汽空腔,进而产生水柱分离,导致断流弥合水锤升压。

为验证断流弥合水锤升压,将无防护下关阀方案管道沿程最小压力水头包络线及阀前压力水头变化情况绘制于图4。因实际工程中压力水头达到-10 m时水体已经汽化,故此时最小压力只代表负压的严重程度,其数值不代表实际压力。

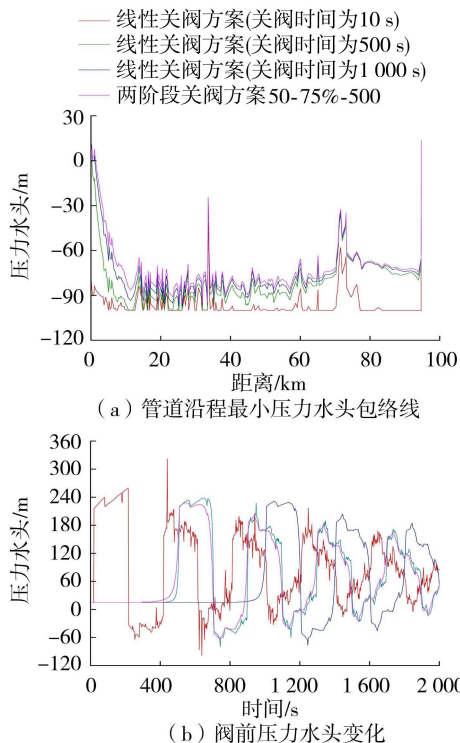


图4 不同关阀方案下管道沿程最小压力水头包络线及阀前压力水头变化

由图4(a)可知,采用线性关阀方案,当关阀时间为10 s时阀前负压水头为-100 m;当关阀时间为500 s时,阀前负压水头为-79.83 m;当关阀时间为1000 s时阀前负压水头为-76.6 m。当采用两阶段关阀方案50-75%-500时,最小负压水头为-94.1 m,阀前负压水头为-62.21 m。4种关阀方案下,管道沿程最低负压及阀前最低负压逐渐升高,且只有10 s关阀方案阀前达到-100 m的汽化压力水头。由图4(b)可知,10 s关阀方案的水锤波第一个波峰的压力水头为259 m,第二个波峰的压力水头为322 m,比首波压力水头高出63 m,而500 s、1000 s线性关阀方案和两阶段关阀方案50-75%-500的最大压力水头均出现在首个波峰。这是因为只有10 s关阀方案的阀前压力水头达到了-100 m,产生了蒸汽空腔,出现水柱中断,水柱再弥合时导致更为严重的断流弥合水锤升压。观察总关阀时间同为500 s的线性关阀和两阶段关阀方案的阀前压力水头变化可知,线性关阀时阀前最大压力水头为263 m,最小压

力水头为-79.83 m,两阶段关阀时阀前最大压力水头为228 m,最小压力水头为-63 m,最大压力水头减小了35 m,最小压力水头提高了16.83 m,在总时间相同的情况下两阶段关阀相比线性关阀可降低水锤的正负压力。由此可见,相比线性关阀,两阶段关阀可在明显减少关阀时间的同时降低关阀所产生的正负水锤压力。但此时管道最低负压水头仍然小于-10 m,仍在汽化压力以下,会产生断流弥合水锤。因此,仅靠改变阀门关闭方式已不能对管道水锤压力起到明显的消减作用,需结合其他水锤防护措施一起进行防护。

3.2 不同类型空气阀防护效果

为了降低管道中负压危害及水柱分离再弥合水锤危害,在采取10-70%-510两阶段关阀方案的基础上,参考空气阀布置原则,在管道凸起点、输水管道长上升段每隔800 m、长下降段每隔500 m、平直段每隔500~1000 m分别布置普通空气阀和三动式空气阀进行负压防护效果对比。

3.2.1 普通空气阀

根据CECS193—2005《城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程》规定空气阀进排气口径宜取输水管道直径的1/8~1/5。选取3种口径的传统普通空气阀进行分析,普通空气阀参数见表2,模拟结果见图5。

表2 普通空气阀口径参数方案

方案	管径/mm	进排气口径/mm
1	3400/3200	500/450
2	3400/3200	550/500
3	3400/3200	600/550

注:“/”前后数据分别表示前半段管径或前半段进排气口径与后半段管径或后半段进排气口径。该工程前半段管径为3400 mm,后半段管径为3200 mm,管径不同的管段上空气阀进排气口径也不同。

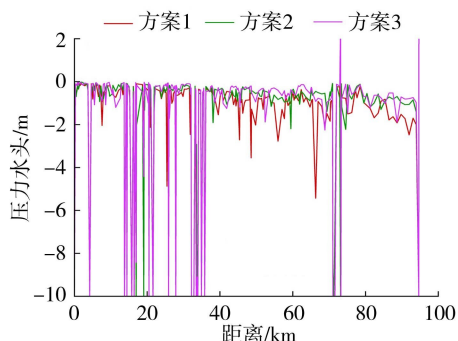


图5 安装普通空气阀管道沿程最小压力水头包络线

从图5可以看出,在使用传统普通空气阀后,管道沿程部分区段的负压得到了部分缓解,但绝大多数管段均存在严重负压,且多个管段的最低负压水头均低于-10 m,管道中发生了汽化现象导致液柱分离,不满足水锤防护要求。通过对比有无空气阀防护下的负压结果可以看出,当发生关阀水锤后,降压

波沿管道传播,沿程压力迅速降低,当压力低于一定值时,空气阀开始进气,气体快速进入管道破坏真空,管道沿程负压有所提升。但由于管道沿程起伏变化较大,依靠普通空气阀防护难以使得管内负压降到安全范围中。

3.2.2 三动式空气阀

三动式空气阀具有负压时大量进气,空管充水时大量排气,正常状态下微量排气的作用。因此将管道沿程的普通空气阀替换为高速进气缓慢排气的三动式空气阀,考虑到阀前压力过大在阀前设置一个同类型的三动式空气阀。为研究不同口径的三动式空气阀对于负压防护效果的影响,设计口径参数方案见表3,计算结果见图6。

表3 三动式空气阀口径参数方案 单位:mm

方案	d_1	d_2	d_3
A	430/400	170/160	17/16
B	530/500	170/160	17/16
C	630/600	170/160	17/16
D	530/500	110/100	17/16
E	530/500	140/130	17/16
F	530/500	170/160	17/16
G	530/500	110/100	10/9
H	530/500	110/100	17/16
I	530/500	110/100	34/32

注: d_1 为进气孔口径, d_2 为大排气孔口径, d_3 为小排气孔口径。

由图6(a)可知,在排气孔口径一定时改变进气孔口径,阀前最低压力水头均为-10m,除阀前处外,A、B、C方案最低压力水头分别为-10、-8.59、-10m,由此可见并不是进气孔口径越大,防护效果越好。由图6(b)可知,当进气孔口径和小排气孔口径一定时改变大排气孔口径,D、E、F方案最低压力水头分别为-8.42、-10、-10m。虽然E、F方案的阀前压力水头均为-10m,但通过观察管道沿程压力变化发现,F方案管道沿程多处负压严重超标,而E方案负压均在-5m以内。总体来说,大排气孔口径越大,管道内的最低负压越小。由图6(c)可知,在进气孔口径和大排气孔口径一定时改变小排气孔口径,3种方案的最低负压均发生在阀前处,G、H、I方案最低压力水头分别为-6.88、-8.42、-10m。说明

随着小排气孔口径的增大,管道最低负压越来越小。试验结果表明,空气阀最优方案为方案G,“快进缓排”的空气阀对于水锤负压的防护具有一定的作用,空气阀进气阶段快速进气有利于管道负压的消除,排气阶段缓慢排气可有效缓解水柱弥合时产生的瞬时水锤增压。

3.3 三动式空气阀联合两阶段关阀方案

根据上述研究发现在管道沿程负压非常严重的情况下单纯改变阀门的关闭方式对于水锤压力并没有较好的削弱作用,对于管道沿程的负压问题设置三动式空气阀可以起到较好的防护效果。但设置三动式空气阀后阀前仍存在较大负压,因此采取三动式空气阀联合两阶段关阀方案对管道进行防护。因研究发现两阶段关阀的关阀折点开度为75%时效果最好,故在其基础上进行两阶段关阀方案研究。经过大量试算,选取5组比较具有代表性的两阶段关阀方案,见表4。

表4 两阶段关阀方案

方案	第一阶段	第二阶段
20-75%-120	20s关75%	100s关25%
20-75%-220	20s关75%	200s关25%
20-75%-320	20s关75%	300s关25%
20-75%-420	20s关75%	400s关25%
20-75%-520	20s关75%	500s关25%

由计算结果可知,三动式空气阀联合20-75%-120两阶段关阀方案的最低负压水头为-8.32m,和原方案(未设空气阀的10-70%-510两阶段关阀方案)相比最低负压升高了16.8%;三动式空气阀联合20-75%-220方案下最低负压水头为-8.30m,和原方案相比最低负压升高了17.0%;三动式空气阀联合20-75%-320方案下最低负压水头为-2.17m,和原方案相比最低负压升高了78.3%;三动式空气阀联合20-75%-420方案下最低负压水头为-1.19m,和原方案相比最低负压升高了88.1%;三动式空气阀联合20-75%-520方案下最低负压水头为-1.10m,和原方案相比最低负压升高了89.0%。因此,对于该工程而言,三动式空气阀联合20-75%-

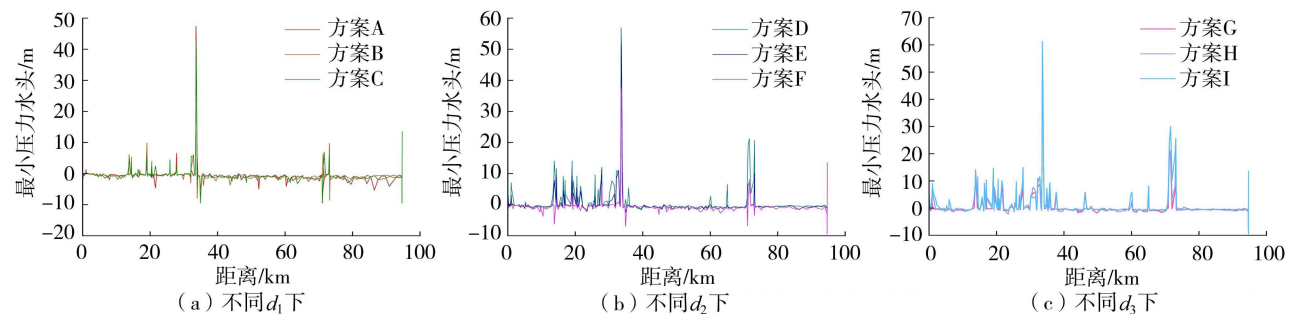


图6 不同进排气孔口径下的管道沿程最小压力水头包络线

420 方案为较优方案。从数值模拟结果可以看出,末端阀门采用不同两阶段关阀方案对水锤压力的影响很大。通过设置三动式空气阀可以有效消减管道中因严重负压导致的断流弥合水锤,联合两阶段关阀方案可有效降低管道沿程的水锤负压。

4 结 论

a. 长距离、多起伏、高落差的重力流输水管道,在末端阀门关闭时,若不采取水锤防护措施,会使管道沿程产生过大的水锤压力,且全线负压达到汽化压力,发生水柱分离,产生更加严重的断流弥合水锤。仅靠改变阀门关闭方式已无法对管道水锤压力起到防护作用。对于这类管道工程的水锤防护应首先考虑消除管道内的严重负压。

b. 在管道沿程合理设置“快进缓排”的空气阀可有效降低管道负压,管道内最低压力水头为 -6.88 m ,全程未出现汽化压力,消除了水柱分离带来的弥合水锤危害。联合较优的两阶段关阀方案,管道内最低压力水头为 -1.19 m ,满足不低于 -2 m 的控制标准。

c. 对于“快进缓排”的空气阀,其进气孔口径并非越大越好,存在一个最优解,需结合实际工程和数值模拟确定该最优解。

参考文献:

- [1] 杨开林. 长距离输水水力控制的研究进展与前沿科学问题[J]. 水利学报, 2016, 47 (3): 424-435. (YANG Kailin. Review and frontier scientific issues of hydraulic control for long distance water diversion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47 (3): 424-435. (in Chinese))
- [2] 蔡付林, 樊子凯, 周建旭, 等. 长距离多支线有压输水系统启动水锤防护[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (4): 1-6. (CAI Fulin, FAN Zikai, ZHOU Jianxu, et al. Start-up water hammer protection for long-distance multi-branch pressurized water conveyance systems [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (4): 1-6. (in Chinese))
- [3] WYLIE E B, STREETER V L, SUO Lisheng. Fluid transients in systems [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1993.
- [4] 郑成志, 高金良, 陈兵, 等. 城市供水管道失效后果评价模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44 (2): 56-60. (ZHENG Chengzhi, GAO Jinliang, CHEN Bing, et al. The failure consequence evaluation model of urban water supply pipeline [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44 (2): 56-60. (in Chinese))
- [5] 张健, 俞晓东, 朱永忠. 长距离供水工程的关阀水锤与

线路充填[J]. 水力发电学报, 2010, 29 (2): 183-189. (ZHANG Jian, YU Xiaodong, ZHU Yongzhong. Study on water-hammer and line packing in long-distance water-supply project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29 (2): 183-189. (in Chinese))

- [6] 莫旭颖, 郑源, 阚阚, 等. 不同关阀规律与出水口形式对管路水锤的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39 (4): 392-396. (MO Xuying, ZHENG Yuan, KAN Kan, et al. Influence of different valve closing rules and outlet form on pipeline water hammer [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39 (4): 392-396. (in Chinese))
- [7] 张雷, 李明, 佟继有, 等. 长距离重力流输水管线水锤计算及防护研究[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34 (1): 121-126. (ZHANG Lei, LI Ming, TONG Jiyou, et al. Calculation and prevention of water hammer for long distance gravity flow water conveyance pipelines [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34 (1): 121-126. (in Chinese))
- [8] 王焰康, 张健, 何城. 长距离重力流输水工程的关阀方案优化[J]. 人民黄河, 2017, 39 (5): 131-134. (WANG Yankang, ZHANG Jian, HE Cheng, et al. Valve closing plan optimization of long-distance gravity flow water-supply project [J]. Yellow River, 2017, 39 (5): 131-134. (in Chinese))
- [9] 袁林, 李云龙, 寇自洋. 长距离重力流输水工程首末两端阀门关阀方案研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40 (6): 118-121. (YUAN Lin, LI Yunlong, KOU Ziyang. Optimization of valve at both ends closing scheme for long-distance gravity flow water conveyance project [J]. Water Resources and Power, 2022, 40 (6): 118-121. (in Chinese))
- [10] 孙巍, 张文胜. 长距离重力流输水管道关阀水锤防护措施分析[J]. 给水排水, 2014, 50 (7): 102-104. (SUN Wei, ZHANG Wensheng. Analysis of water hammer protection measures for shut-off valves of long distance gravity flow pipelines [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 50 (7): 102-104. (in Chinese))
- [11] ZHANG Wenqi, YANG Shuai, WU Dazhuan, et al. Dynamic interaction between valve-closure water hammer wave and centrifugal pump [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235 (23): 6767-6781.
- [12] 黄时锋, 周文萍, 程佳秋. 输水系统水泵失电工况出口阀关闭规律的优选[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34 (3): 56-60. (HUANG Shifeng, ZHOU Wenping, CHENG Jianqiu. Optimization research on closure law of outlet valve under power failure condition in water conveyance system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34 (3): 56-60. (in Chinese))
- [13] 韩凯, 丁法龙, 茅泽育. 长距离有压输水工程泵站水锤的数值分析[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (2): 69-

75. (HAN Kai, DING Falong, MAO Zeyu. Numerical analysis of water hammer in a long-distance pressurized water transfer project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (2): 69-75. (in Chinese))
- [14] SHI Lin, ZHANG Jian, YU Xiaodong, et al. Water hammer protection for diversion systems in front of pumps in long-distance water supply projects [J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(2) : 211-218.
- [15] 赵莉, 范闯, 申虎贲, 等. 液柱分离型水锤新空腔模型 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (2): 37-41. (ZHAO Li, FAN Chuang, SHEN Huben, et al. New cavity model for water hammer with liquid column separation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2) : 37-41. (in Chinese))
- [16] BERGANT A, SIMPSON A R, TIJSELING A S. Water hammer with column separation; a historical review [J]. Journal of Fluids and Structures, 2006, 22(2) : 135-171.
- [17] 金锥, 姜乃昌, 汪兴华. 停泵水锤及其防护 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [18] 杨春霞, 李倩, 马经童, 等. 多分水口长距离输水工程停泵水锤防护措施 [J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42 (3): 250-255. (YANG Chunxia, LI Qian, MA Jingtong, et al. Water hammer protection measures for long-distance water transmission projects during pump stop with multiple water diversions outlets [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42 (3): 250-
255. (in Chinese))
- [19] 梁圣辰, 张健, 贺蔚, 等. 长距离输水系统串联多阻抗调压室的水锤防护效果 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (2): 170-175. (LIANG Shengchen, ZHANG Jian, HE Wei, et al. Water hammer protection effect of series throttled surge chambers in long-distance water conveyance system [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (2): 170-175. (in Chinese))
- [20] LI Xiaozhou, WANG Tao, ZHANG Yanhe, et al. Study on the factors influencing air valve protection against water hammer with column separation and rejoinder [J]. Water Infrastructure, Ecosystems and Society, 2022, 71 (9): 949-962.
- [21] LI Xiaozhou, YAN Tianzhu, BI Xiaojian, et al. Influence of traditional and antislam air valve characteristics on transient pressure control [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2022, 13(3) : 04022022.
- [22] 高金良, 郑成志, 刁美玲, 等. 高起伏长输管线水锤模拟及防护方案优选 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44 (8): 24-26. (GAO Jinliang, ZHENG Chengzhi, DIAO Meiling, et al. Study on optimal surge protection for high-undulate long-distance water transmission pipeline [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44 (8): 24-26. (in Chinese))

(收稿日期: 2023 - 11 - 08 编辑: 骆超)

(上接第 54 页)

- [17] 殷锴. 海岸带柔性植被对极端风暴潮动力衰减规律研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [18] 常留红, 覃瓶山, 郑景琦, 等. 水沙条件对大湖口河冲淤特性的影响 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (4): 15-20. (CHANG Liuhong, QIN Pingshan, ZHENG Jingqi, et al. Influence of water and sediment conditions on scouring and silting characteristics of Dahukou River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (4): 15-20. (in Chinese))
- [19] 许慧. 植被型生态海岸对台风风暴潮灾害防护效应的数值模拟 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2022.
- [20] 李爱莲, 刘泽, 洪新, 等. 台风条件下 ERA5 再分析数据对中国近海适用性评估 [J]. 海洋科学, 2021, 45 (10): 71-80. (LI Ailian, LIU Ze, HONG Xin, et al. Applicability of the ERA5 reanalysis data to China adjacent sea under typhoon condition [J]. Marine Sciences, 2021, 45 (10): 71-80. (in Chinese))
- [21] 孟宪贵, 郭俊建, 韩水清. ERA5 再分析数据适用性初步评估 [J]. 海洋气象学报, 2018, 38 (1): 91-99. (MENG Xiangui, GUO Junjian, HAN Yongqing. Preliminarily assessment of ERA5 reanalysis data [J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(1) : 91-99. (in Chinese))
- [22] 张鹏, 陈晓玲, 陆建忠, 等. 基于遥感的鄱阳湖丰水期悬浮泥沙数值模拟预测 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2017, 42 (3): 369-376. (ZHANG Peng, CHEN Xiaoling, LU Jianzhong, et al. Suspended sediment transport modeling of Poyang Lake in the wet season based on remote sensing data [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(3) : 369-376. (in Chinese))
- [23] JIANG Shanhu, WEI Linyong, REN Liliang, et al. 2023. Evaluation of IMERG, TMPA, ERA5, and CPC precipitation products over Chinese mainland: spatiotemporal patterns and extremes [J]. Water Science and Engineering, 16(1) : 45-56.
- [24] HU Kelin, DING Pingxing, WANG Zhengbing, et al. A 2D/3D hydrodynamic and sediment transport model for the Yangtze Estuary, China [J]. Journal of Marine Systems, 2009, 77(1/2) : 114-136.

(收稿日期: 2023 - 10 - 23 编辑: 俞云利)