

山丘区自压输水管道水锤防护措施研究

石晓悟¹, 何武全^{1,2*}, 田雨丰¹, 李千禧¹

(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2.旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:【目的】避免山丘区自压输水管道因水锤而遭受破坏, 保障管道的安全运行。【方法】针对山丘区地势起伏的自压输水管道中水锤现象正负压较大的特点, 以陕西省千阳县一自压输水管道工程为例, 依据水锤基本计算理论, 采用倾斜直管和拟合等效短直管相结合的数值模拟方法, 分别模拟各个驼峰断面设置进排气阀和末端控制阀门断面前设置超压泄压阀的防护效果, 对计算模拟结果进行分析, 确定水锤防护措施及具体位置。【结果】在无水锤防护措施的情况下, 管道末端控制阀门快速关闭时管道内沿管线产生明显负压, 最大负压水头达到-20.06 m, 管道末端控制阀门断面处正压最大, 正压水头达到87.58 m; 合理设置水锤防护措施后, 管线全程无负压, 全程正压最大水头为70.88 m, 未超过管道允许的最大压力。【结论】对于山丘区自压输水管道, 采用进排气阀和超压泄压阀联合防护水锤的方法, 可以有效缓解水锤现象的发生, 保证管道内的压力在设计压力允许范围内。

关键词: 山丘区; 自压管道输水; 水锤防护; 数值模拟; 进排气阀; 超压泄压阀

中图分类号: TV134

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023028

OSID:



石晓悟, 何武全, 田雨丰, 等. 山丘区自压输水管道水锤防护措施研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(9): 138-144.

SHI Xiaowu, HE Wuquan, TIAN Yufeng, et al. Methods to Protect Gravity Flow Pipeline in Hilly Area Affected by Water Hammer[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(9): 138-144.

0 引言

【研究意义】我国水资源分布不均问题突出, 水资源供需矛盾尖锐, 长距离输水工程是解决这一问题的有效途径。长距离自压输水管道因其对地质条件和外部环境的要求较低, 施工简单且运行成本低而被实际工程广泛应用^[1]。但当输水管道遇到突发状况导致管道系统末端阀门突然关闭时, 将会引起管内压力剧烈震动, 这对工程的安全运行造成了严重威胁^[2-4], 特别是山丘区长距离自压管道输水运行过程中受到地形地势起伏的影响很容易发生水锤现象, 因此, 管道的安全防护问题是长距离自压管道输水工程中常见且需要亟待解决的问题之一^[5-8]。

【研究进展】常见的水锤防护装置主要包括调压室、进排气阀、空气罐、超压泄压阀和液控蝶阀等^[9-11]。目前, 已经有很多学者针对长距离输水管道的水锤防护问题进行了大量研究。张立春等^[12]提出输水管路中因水锤出现局部压力高点时, 通过设置超压泄压阀与空气罐联合防护可以消减正压过大的现象, 使管道的最大压力以及泵站的倒转速度满足规范要求。

Yazdi 等^[13]以水锤防护设备的尺寸和布置方式为优化目标进行了单目标和多目标优化设计, 利用神经网络确定了输水系统中防护设备的最优尺寸和布置方式, 其中采用单目标方法可以节约成本 12.5%, 多目标方法可以节约将近 30%的成本。李楠等^[14]针对停泵水锤提出了空气罐与超压泄压阀联合防护方案, 对泵后高压管段的水锤防护有显著的防护效果, 且对超压泄压阀的启闭规律进行了敏感性分析, 认为断电停泵事故中超压泄压阀应快速开启后保持较长时间的全开度状态可以充分缓解升压水锤。沈金娟等^[15]建立了不同压差下空气阀的排气流量系数曲线方程, 提高了空气阀的数值模拟精度, 并进行了长距离输水管道空气阀的选型研究, 提出了长距离输水管道进排气阀的选型方法。【切入点】在实际工程中, 因每个工程面临的实际外部环境和工程修建情况不同, 通过计算模拟分析确定采取何种防护措施能更有效对工程进行水锤防护的研究是很有必要的。【拟解决的关键问题】本文以陕西省千阳县一山丘区自压管道输水工程为例, 采用倾斜直管和拟合等效短直管相结合的数值模拟方法, 通过数值模拟水锤现象发生时, 在产生负压极大值的驼峰断面设置进排气阀和正压最大的管道系统末端控制阀门断面前设置超压泄压阀的防护效果, 确定水锤防护装置的有效安装位置, 使得水锤防护效果最优化, 以此来保证输水灌溉管道工程的安全运行。

收稿日期: 2023-01-30 修回日期: 2023-05-23 网络出版日期: 2023-09-15

基金项目: 国家重点研发计划课题(2022YFD1900402)

作者简介: 石晓悟(1997-), 女, 甘肃天水人。硕士研究生, 研究方向为节水灌溉工程技术。E-mail: 1392453231@qq.com

通信作者: 何武全(1967-), 男, 陕西合阳人。副教授, 硕士, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: hewq@nwfufu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

1 数学模型及算法

1.1 水锤计算的数学模型

针对山丘区自压输水管线地形落差大、距离长和地势起伏的特点,采用倾斜直管和拟合等效短管相结合的数值计算模型。

1.1.1 倾斜直管的水锤计算

倾斜直管采用特征线法进行计算,有压管道的水锤基本计算控制方程包括连续性方程和运动方程^[16]:

连续性方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial s} + v \sin \theta + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial s} = 0. \quad (1)$$

运动方程:

$$g \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\lambda v |v|}{2D} = 0, \quad (2)$$

式中: H 为测压管水头 (m); v 为管道流速 (m/s); t 为时间 (s); a 为水锤波速 (m/s); θ 为相对于水平线的管道角度 ($^\circ$); s 为节点位置; λ 为摩擦系数; g 为重力加速度 (m^2/s); D 为管道直径 (m)。

1.1.2 弯曲管道的水锤计算

1) 划分拟合管段

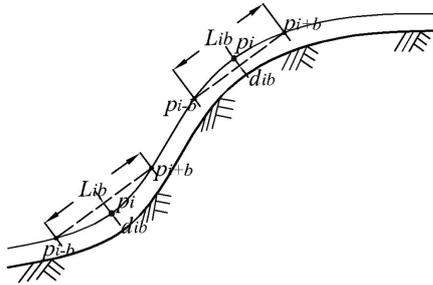


图1 弯曲管道节点曲率计算

Fig.1 Curvature calculation diagram of curved pipe node

如图1所示,弯曲管道内计算节点 P_i , 到管道内节点前后连接得到的弦之间的距离 d_{ib} 为:

$$d_{ib} = \frac{|Ax_i + By_i + C|}{L_{ik}}, \quad (3)$$

式中: $Ax_i + By_i + C = 0$ 为管道内两节点连接得到的弦直线方程; L_{ib} 为弦长 (m)。

弯曲管道内计算节点 P_i 点的曲率为:

$$c_{ib} = \frac{d_{ib}}{L_{ib}}. \quad (4)$$

式(4)可求得管道所有节点的曲率,节点的曲率越大,该点越可能是弯曲管道中弧度不连贯的转折点,通过寻找转折点将弯曲管道划分为更细致的连贯弧管段作为拟合管段。

2) 管段拟合

拟合管段中的局部切线作为拟合弯曲管道的依

据,利用曲线可以由多段短直线拟合的极限思想,弯曲管道可以被沿管道不同节点,也就是各切点之间的短直管道拟合进行水锤计算。

1.2 进排气阀的边界条件

进排气阀是一种补气和排气的水锤防护装置,主要用来消除管道中的负压。由于进排气阀通常涉及到气液两相,所以其边界条件是非常复杂的,对于空气从进排气阀中流进流出可以采用空气动力学中拉瓦尔喷管公式。在使用该公式前首先需做如下假设^[17]:

1) 认为空气是理想气体且进出进排气阀是等熵过程;

2) 进入管内的气体迅速与水体达到热平衡,并最终与水体保持同温;

3) 进入管内的空气滞留在进排气阀附近;

4) 水体表面高度基本保持不变。

按照空气流进、流出的速度不同,进排气阀的边界条件可以分为以下4种情况:

1) 空气以亚音速等熵流进 ($1 > \frac{p}{p_0} > 0.5283$)

$$\dot{m} = C_m A_m \sqrt{7 p_0 \rho_0 \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{1.4286} - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{1.714} \right]}, \quad (5)$$

式中: \dot{m} 为空气质量流量; C_m 为进排气阀的进气流量系数; A_m 为进排气阀进气时的开启面积 (m^2); p 为管内绝对压力 (Pa); p_0 为管外大气压力 (Pa); ρ_0 为大气密度 (kg/m^3); R 为气体常数; T_0 为大气的绝对温度。

2) 空气以临界流速等熵流进 ($\frac{p}{p_0} \leq 0.5283$)

$$\dot{m} = C_m A_m \frac{0.686}{\sqrt{RT_0}} p_0. \quad (6)$$

3) 空气以亚音速等熵流出 ($1.894 > \frac{p}{p_0} > 1$)

$$\dot{m} = -C_{out} A_{out} p \sqrt{\frac{7}{RT} \left[\left(\frac{p_0}{p} \right)^{1.4286} - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{1.714} \right]}, \quad (7)$$

式中: \dot{m} 为空气质量流量; C_{out} 为进排气阀的排气流量系数; A_{out} 为进排气阀排气时的开启面积 (m^2); p 为管内绝对压力 (Pa); ρ 为进排气阀处空穴气体的密度 (kg/m^3); p_0 为管外大气压力 (Pa); R 为气体常数; T 为管内的绝对温度。

4) 空气以临界流度等熵流出 ($\frac{p}{p_0} > 1.894$)

$$\dot{m} = -C_{out} A_{out} \frac{0.686 p}{\sqrt{RT}}. \quad (8)$$

1.3 超压泄压阀的边界条件

超压泄压阀是一种升压水锤防护装置,一般设置在管道系统中高压位置。如图2所示,由连续性条件

可得到超压泄压阀的边界条件^[14]为:

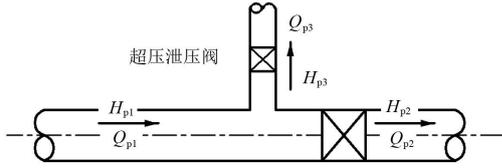


图2 超压泄压阀水力特性

Fig.2 Hydraulic characteristic diagram of over-pressure relief valve

$$H_{p1}=H_{p2}=H_{p3}, \quad (9)$$

$$Q_{p1}+Q_{p2}+Q_{p3}=0, \quad (10)$$

式中: Q_{p1} 、 Q_{p2} 、 Q_{p3} 分别为超压泄压阀上游、下游和阀处的流量 (m^3/s); H_{p1} 、 H_{p2} 、 H_{p3} 分别为超压泄压阀上游、下游和阀处的水头压力 (m)。

当管道压力 H_p 小于超压泄压阀启动压力 H_x 时, $Q_{p3}=0$; 当管道压力超过超压泄压阀启动压力时, 泄压阀的进出口处有:

$$Q_{p3} = C_d A_G \sqrt{2g(H_{p3} - H_0)}, \quad (11)$$

式中: C_d 为流量系数; A_G 为开口面积 (m^2); H_0 为管道外部水头压力 (m)。

2 工程实例应用与分析

陕西省千阳县某管道输水工程, 地处渭北旱塬西部丘陵沟壑区, 管线沿途地形起伏较大。水源位于千阳县岭北坡的帽儿山, 通过上游调节水池自压输水至下游蓄水池, 输水管线全长 1 984.1 m, 上游调节水池设计水位高程为 887.35 m, 管道首端高程为 886 m, 管道末端高程为 835.44 m, 首末端地形高程差为 51.91 m, 管线末端设置有控制阀门, 管道的纵断面如图 3 所示。

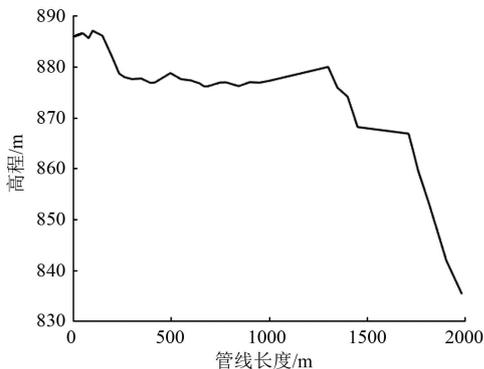


图3 输水管道纵断面图

Fig.3 Vertical section of water transmission pipeline

该工程管道采用 DN 250-UPVC 塑料管, 壁厚 7 mm, 内径为 236 mm。输送流体为水, 体积弹性系数 $K=2.06 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, 管壁材料的弹性系数 $E=3 \text{ 300 MPa}$, 泊松比为 0.45, 水头损失系数为 0.014 93。稳态运行时, 水流在管道内的流速为 1.03 m/s, 通过管

道的流量为 44.9 L/s, 管线沿程的运行水头平稳逐渐递减, 管线末端是管线高程的最低点, 水头损失 6.25 m。如图 4 所示, 正常运行管线全程无负压, 满足安全运行条件。

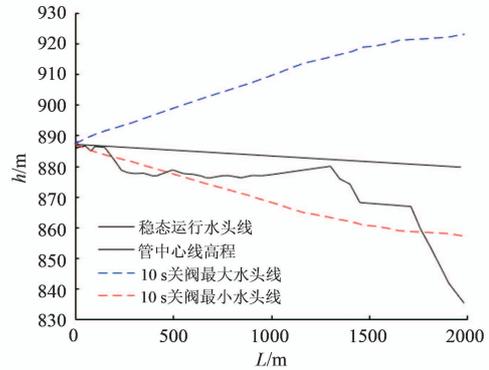


图4 无防护措施下最大最小水头包络线

Fig.4 Maximum and minimum head envelope without protective measures

2.1 无防护措施的水锤分析

山丘区长距离自压输水管道系统中, 不合理的关闭方式或管道中发生故障意外关闭, 都会导致管路中的压力急剧变化。在无防护措施的情况下, 管道系统末端控制阀门 10 s 快速关闭时, 管道沿线产生最大与最小的压力水头如图 4 所示。管线沿驼峰处产生明显负压, 最大负水头达到 -20.06 m, 位于桩号 K1+300 处, 在实际工程中, 当压力水头降至 -10 m 时, 管道中的水体会发生气化; 正压水头最大达到 87.58 m, 位于管道末端控制阀门断面, 对管道的危害极大。

产生这种现象的原因是管道内水流在正常运行过程中, 管道系统末端阀门忽然关闭导致水流流向下流的速度骤降为 0, 此时阀门处压力迅速增大形成压力波向上游传播, 同时阀门处也因压力差出现水体被压缩、管道膨胀的现象, 压力波在管道内来回传播形成的压强通常情况下远远大于管道内水流正常运行时候的压强。因此, 对该工程进行水锤防护是非常必要的。

为了消减发生水锤现象时的正负水头给管道带来的破坏, 根据图 4 的模拟结果, 拟在 4 个产生负压相对极大值的位置, 即有起伏的驼峰最高点设置进排气阀消除管道中的负压。此外, 在管道系统末端控制阀门前设置超压泄压阀, 对管道中产生过大的正压进行防护。

2.2 进排气阀防护的水锤分析

在输水管路系统中安装进排气阀是一种常用的消减压的措施, 管道系统因突发状况内部出现负压时, 进排气阀可以通过吸入空气从而消减管道内的负压, 正常运行时还可以排出管道内存在的气体。针对图 4 中发生的水锤现象, 负压沿管线中段部分较为严重, 出现这种现象的主要原因是整条管线的大起伏驼

峰位置,也就是相对高程较高的管线集中在管道中段位置,故拟在驼峰1(K0+100)、驼峰2(K0+500)、驼峰3(K1+300)、驼峰4(K1+700)处分别设置进排气阀,主要目的是有效分析进排气阀布置在管道各个驼峰时能够消减水锤负压的效果程度。进排气阀单独布置后进行分析,所得结果如图5所示。

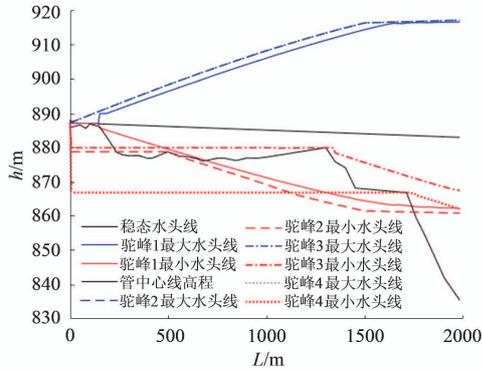


图5 进排气阀单独设置时驼峰处水头波动线

Fig.5 Head fluctuation line at hump when inlet and exhaust valves are set separately

由图5的模拟结果可以看出,进排气阀单独布置在各个驼峰断面处能有效消减相应位置的负压,其中,在驼峰1处设置进排气阀可以有效改善输水管道前半段的负压,而在驼峰3处设置进排气阀可以有效改善输水管道后半段的负压,这是因为管道出现负压受到山丘区地形地势,以及管道形状(也就是高差和驼峰)的影响,有些高差相对较小的位置出现的负压峰值可能较小,因此在地势较高的地方布置进排气阀可以很好地利用地势高差兼顾“小高差”产生的负压,这样做可以避免实际工程中按经验每隔1 km直接建设进排气阀^[7-8]带来的经济损失和物资浪费,以及防止因进排气阀数量过多导致开关进排气阀时发生二次水力现象。

故拟定进排气阀布置的方案一:在驼峰1和驼峰3处同时设置进排气阀,以达到有效消减整个管道负压的效果。计算模拟结果如图6所示。

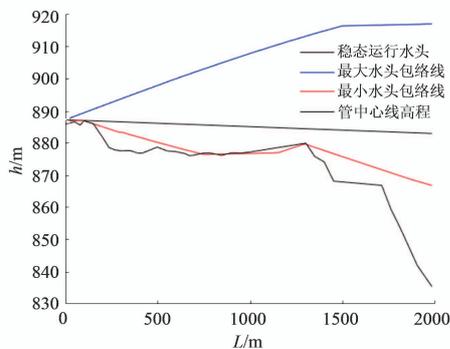


图6 进排气阀布置方案一水头波动线

Fig.6 Inlet and exhaust valve layout plan I head fluctuation line

由图6可看出,进排气阀按方案一进行布置后,

整个管线中负压得到有效消减,但在管路1000~1500 m之间还存在明显负压,说明方案一不能完全消除整条输水管道的负压,为保障输水管道安全运行,故拟定进排气阀布置方案二:在方案一的基础上,桩号K0+900处再加设一个进排气阀,模拟结果如图7所示。

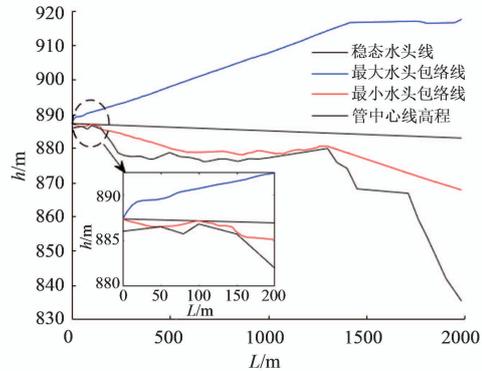


图7 进排气阀布置方案二水头波动线

Fig.7 Inlet and exhaust valve layout plan II head fluctuation line

由图7的模拟结果可以看出,方案二的进排气阀布置可以完全消除输水管道系统中的负压,表明按照方案二布置进排气阀在该工程中是合理的,满足规范^[18]中每隔0.5~1 km设置一个进排气阀要求的同时,将布置进排气阀的数量降到最低,有效节约经济成本。加设进排气阀后管线中各驼峰断面以及管道末端控制阀门断面的相对特征压力见表1。

表1 安装进排气阀后特殊断面的特征压力

Table 1 Characteristic pressure of special section after installation of inlet and exhaust valve

桩号	最大压力/m	最小压力/m	稳态压力/m
K0+100	3.87	0.34	0.34
K0+900	29.12	1.68	8.36
K1+300	34.33	0.67	4.51
K1+984.1	82.36	41.57	47.66

由表1可以看出,管线负压极大值的驼峰断面处无负压,说明进排气阀可以有效防护山丘区自压输水管道工程发生水锤现象时的负压,这与前人^[3]的研究结果一致,但是进排气阀对正压几乎无明显影响,因此对管路的危害依然存在,所以仅靠安装进排气阀无法降低管路中的正压。基于此,需在管路中正压最大的断面,即管道末端控制阀门前设置超压泄压阀来达到降低正压,保护管道的目的。

2.3 与超压泄压阀联合防护的水锤分析

超压泄压阀一般设置在自压输水管道末端的关闭阀上游,当输水系统突然出现过高正压时,及时打开超压泄压阀的阀门释放部分高压水,从而起到保护管道的作用,其公称直径宜选取为主管道直径的 $1/5\sim 1/4$ ^[18]。通过前面的计算模拟,在采用方案二布置了进排气阀的基础上,输水管道末端控制阀门上游设

置一个 DN50 mm 的超压泄压阀, 发生水锤现象开启超压泄压阀后, 各断面的压力分布见表 2, 沿管线全程的水头波动如图 8 所示。

由表 2 可以看出, 设置超压泄压阀与进排气阀联合后, 管线沿程最小压力为正, 最大压力为 70.88 m, 是稳态压力的 1.48 倍, 满足水锤防护措施设计应保证输水管道最大水锤压力不超过 1.3~1.5 倍的防护要求^[18]。

表 2 安装超压泄压阀后的特征压力

Table 2 Characteristic pressure after installation of over-pressure relief valve

最大压力/m	最小压力/m	稳态压力/m	最大压力与稳态压力之比
70.88	0.20	47.66	1.48

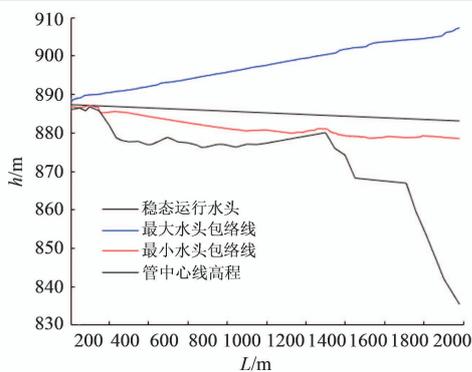


图 8 联合防护的水头波动线

Fig.8 Head fluctuation line of joint protection

图 8 所表示的管线全程的压力变化可以看出, 在采取联合防护措施的前提下, 沿管线全程无水锤产生的负压, 全局的正压也没有超过管道允许的最大压力。也就是说, 通过模拟进排气阀的防护效果来确定进排气阀的具体布置位置和数量, 可以有效合理地满足防护负压的同时还能相应地降低经济成本, 结合超压泄压阀联合防护可以有效消除水锤现象对输水管道带来的不利影响, 保证工程安全运行。

3 讨论

在没有水锤防护措施的情况下, 自压管道输水工程中末端控制阀门快速关闭时, 管道内出现较为严重的水锤现象, 正水头最大达到 87.58 m, 负水头最大可达 -20.06 m。合理设置防护装置可以有效防护水锤, 保障管道输水工程的安全运行。进排气阀是常用的预防水锤负压的防护装置, 与前人的研究^[1,7,19]相比, 本文采用弯管拟合与直管结合的水锤计算模拟方法, 模拟了进排气阀和超压泄压阀防护下管道内压的变化情况, 改善了传统水锤计算方法中弯曲管道直接近似为直管造成的精度误差, 并通过计算模拟进排气阀在各个负压相对较大断面, 即驼峰处分别布置进排气阀时的防护效果, 根据单个进排气阀防护后负压出现较

大的位置, 合理判断如何布置进排气阀的方案, 减少了进排气阀布置时的试算工作量。此外, 与规范^[18]中 1 km 间隔设置进排气阀的处理方法相比, 明确合理选择进排气阀的数量, 考虑了经济性的同时, 保证了进排气阀对于负压的防护效果。在此基础上, 通过联合超压泄压阀对管道末端阀门处的正压进行防护。计算模拟结果表明进排气阀能够有效消减管道系统中的负压, 超压泄压阀能够有效防护管道末端阀门处产生的正压, 这与李楠等^[14]和沈金娟^[15]研究成果相符, 联合防护可以保证管道输水工程在发生特殊状况导致水锤现象发生条件下的安全性和可靠性。

本研究为山丘区自压输水管道水锤防护方案的快速有效布置提供了一种参考方法, 但仍存在一些局限性, 本研究主要针对山丘区单一管线, 若遇管道条件复杂的情况, 水锤防护还需进一步计算确定防护方案。

4 结论

1) 以陕西省千阳县一山丘区长距离自压输水管道工程为例, 通过水锤的基本计算原理, 结合实际工程发生水锤时的具体特征, 提出了进排气阀和超压泄压阀联合的水锤防护措施。

2) 针对山丘区自压输水管道工程地形起伏大的特点, 采用倾斜直管和拟合等效短管相结合的数值模拟方法, 计算模拟单独设置进排气阀时的工作压力可以快速有效地确定进排气阀的最优安装位置, 且进排气阀只能消除管道中的负压, 对正压基本无明显影响。

3) 超压泄压阀对正压防护有显著效果, 进排气阀和超压泄压阀联合的水锤防护措施, 可以有效消减该工程在发生水锤现象时产生危害管道的水锤压力波, 从而保证输水管道的正常运行。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] 朱晓璟. 长距离大型区域重力流输水系统水锤防护计算研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
ZHU Xiaojing. Study on calculation of water hammer protection of long distance and large-scale regional water gravitational transportation pipeline system[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [2] TANAKA Y, TSUDA K. Model-driven development of water hammer analysis software for irrigation pipeline system[C]//JEZIC G, CHEN-BURGER Y H, HOWLETT R, et al. Agent and Multi-Agent Systems: Technology and Applications. Cham: Springer, 2016: 301-317.
- [3] 陈聃. 长距离连续性驼峰有压输水管路的水锤特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
CHEN Dan. Study on water hammer characteristics of long-distance pressurized pipeline with continuous-hump[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020..
- [4] LYU J W, ZHANG J, WANG T Y. Study on water hammer protection of the siphon breaking structure in the water supply system[J]. Journal of

- Water Supply: Research and Technology-Aqua, 2022, 71(3): 478-489.
- [5] 王思琪, 俞晓东, 倪尉翔, 等. 长距离供水工程空气罐调压塔联合防护水锤[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(5): 406-412.
- WANG Siqi, YU Xiaodong, NI Weixiang, et al. Water hammer protection combined with air vessel and surge tanks in long-distance water supply project[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(5): 406-412.
- [6] ZHAO L, YANG Y S, WANG T, et al. Research on the protection of pipelines with multiple column separation and water hammer of cavities collapsing[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 300(3): 032 034.
- [7] 张景望, 吴建华, 高洁, 等. 长距离重力输水系统水锤模拟及其防护研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(5): 57-60.
- ZHANG Jingwang, WU Jianhua, GAO Jie, et al. Research on water hammer simulation and protection for long distance gravity flow water conveyance system[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(5): 57-60.
- [8] 李建宇, 魏举旺. 长距离重力输水管线末端关阀水锤分析及防护[J]. 中国给水排水, 2022, 38(7): 51-55.
- LI Jianyu, WEI Juwang. Analysis of valve closing water hammer at the end of long-distance gravity flow water transmission pipeline and its protection[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(7): 51-55.
- [9] 邱象玉, 王浩, 孙庆宇. 缓闭蝶阀关闭规律对事故停泵水锤的影响[J]. 人民黄河, 2019, 41(1): 101-105.
- QIU Xiangyu, WANG Hao, SUN Qingyu. Analysis of closure rules of slow closing check valve for accidental pump-stop water hammer[J]. Yellow River, 2019, 41(1): 101-105.
- [10] KOU Y F, YANG J M, KOU Z M. A water hammer protection method for mine drainage system based on velocity adjustment of hydraulic control valve[J]. Shock and Vibration, 2016, 2016: 1-13.
- [11] 李玲玲, 童保林, 刘志勇, 等. 空气罐在高原山区复杂地形条件下高扬程泵站水锤防护中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(S1): 56-61.
- LI Lingling, TONG Baolin, LIU Zhiyong, et al. Application of air tank in water hammer protection of high head pumping station under complex terrain condition in plateau mountainous area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(S1): 56-61.
- [12] 张立春. 长距离高扬程输水管道过渡过程分析与防护[J]. 人民长江, 2013, 44(16): 18-21, 28.
- ZHANG Lichun. Analysis on hydraulic transition process of water conveyance pipeline and water hammer protection[J]. Yangtze River, 2013, 44(16): 18-21, 28.
- [13] YAZDI J, HOKMABADI A, JALILIGHAZIZADEH M R. Optimal size and placement of water hammer protective devices in water conveyance pipelines[J]. Water Resources Management, 2019, 33(2): 569-590.
- [14] 李楠, 张健, 石林, 等. 空气罐与超压泄压阀联合水锤防护特性[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(3): 254-260.
- LI Nan, ZHANG Jian, SHI Lin, et al. Water hammer protection characteristic of combined air vessel and overpressure relief valve[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(3): 254-260.
- [15] 沈金娟. 长距离输水管道进排气阀的合理选型及防护效果研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- SHEN Jinjuan. The study on model selection and protective effect of air inlet and release valves in long-distance water supply pipelines[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013.
- [16] 吕宏兴, 裴国霞, 杨玲霞. 水力学[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- LYU Hongxing, PEI Guoxia, YANG Lingxia. Hydraulics[M]. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2011.
- [17] WYLIE E B, STREETER V L. 瞬变流[M]. 清华大学流体传动与控制教研组, 译. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- WYLIE E B, STREETER V L. Fluid Transients[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1983.
- [18] 中国工程建设标准化协会. 城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程: CECS 193—2005[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [19] 郭伟奇, 吴建华, 李娜, 等. 长距离重力输水系统水锤防护措施研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(11): 124-126, 130.
- GUO Weiqi, WU Jianhua, LI Na, et al. Research on water hammer protection measures for long-distance gravity flow water delivery systems[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(11): 124-126, 130.

Methods to Protect Gravity Flow Pipeline in Hilly Area Affected by Water Hammer

SHI Xiaowu¹, HE Wuquan^{1,2*}, TIAN Yufeng¹, LI Qianxi¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Yangling 712100, China)

Abstract: 【Background and Objective】 Gravity-driven pipelines have low impact on geological environment, low leakage, simple construction and low operation cost. They have been widely used in irrigation and water supply projects. When the end valve is suddenly turn off under unpredicted circumstances, however, it could result in water hammer and pressure vibration in the pipelines, threatening safe operation of the system. Considering water hammer is more likely to occur in long-distance gravity flow pipeline in hilly areas, this paper explore efficacy of different methods to ameliorate the damaging effect of water hammer on gravity flow pipeline in hilly areas. 【Method】 The study is based on the gravity pipeline project in Qianyang County, Shaanxi province. Numerical simulation combined with inclined straight pipes and fitted equivalent short straight pipe is used to simulate the protective effect of setting inlet and exhaust valve in each hump section and an overpressure relief valve in the front of the end control

valve section. We analyzed the simulation results to determine the effect of these methods in alleviating water hammer at specific locations in the pipelines. **【Result】** Without the water hammer protection measure, when the control valve at the end of the pipeline is turn off quickly, there is no noticeable negative pressure along the pipeline; the maximum negative pressure head reaches - 20.06 m, and the maximum positive pressure at the section of the control valve at the end of the pipeline reaches 87.58 m. Installation of the water hammer protection measures eliminates the occurrence of negative pressure in the pipeline and reduces the maximum positive pressure head in the pipeline to 70.88 m, which is lower than the critical pressure for occurrence of water hammer in the pipelines. **【Conclusion】** For the gravity-driven water transmission pipeline in hilly areas, combination of inlet and exhaust valve and an over-pressure relief valve can effectively alleviate the occurrence of water hammer and ensure that the pressure in the pipeline is less than the critical pressure required in the design of the pipelines.

Key words: hilly area; gravity flow pipeline water conveyance; water hammer protection; numerical simulation; inlet and exhaust valve; over-pressure relief valve

责任编辑: 赵宇龙

(上接第 91 页)

The Effect of Interaction between Biochar and Nitrogen Fertilizer on Ammonia Volatilization in Salinized Soil

HE Shuai^{1,2}, WANG Guodong^{1,2}, ZHANG Lei^{3*}

(1. Research Institute of Farmland Water Conservancy and Soil-fertilizer, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China; 2. Key Laboratory of Northwest Oasis Water-saving Agricultural of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832000, China; 3. College of Agriculture, Tarim University, Alaer 843300, China)

Abstract: **【Objective】** Investigating the Interactive Effects of Biochar and Nitrogen Fertilizer on Ammonia Volatilization in Saline Soils. **【Method】** We investigated the effects of applying biochar, nitrogen fertilizer, and their combination on ammonia volatilization rates and mineral nitrogen content in soils with varying degrees of salinity through indoor soil incubation experiments. **【Result】** The addition of biochar led to pH enhancement in non-saline and moderately saline soils, while its effect on heavily saline soil pH was not statistically significant. Moreover, in the presence of nitrogen application, the inclusion of biochar significantly suppressed ammonia volatilization rates in non-saline and moderately saline soils, resulting in reductions of 18.06% and 50.88%, respectively, in total ammonia volatilization compared to the sole nitrogen application. The ammonia volatilization rates were also decreased by 14.57% and 43.68% in non-saline and moderately saline soils, respectively. These findings underscore the potential of biochar to ameliorate ammonia losses in non-saline and moderately saline soils when combined with nitrogen application. **【Conclusion】** The addition of biochar has been shown to have a significant impact on reducing ammonia volatilization losses in both non-saline and moderately saline soils.

Key words: biochar; nitrogen fertilizer; salinized soil; the rate of ammonia volatilization

责任编辑: 韩洋