

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.13.009

傍河多井水源系统水锤模拟及防护研究

雷春元¹, 杨瑞虎^{2,3}, 王伟^{2,3}, 尚渝钧^{2,3}, 王彤^{2,3}, 吴荣础^{2,3},
刘永佳¹

(1. 西安市自来水有限公司, 陕西 西安 710082; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 3. 长安大学 住房和城乡建设部给水排水重点实验室, 陕西 西安 710061)

摘 要: 针对傍河多井水源系统多水泵、多水位、多工况、多边界条件以及管道系统复杂等特点,根据水锤计算基本微分方程及相应的特征线方程,对全部水源井同时事故停泵工况进行水锤模拟,提出了气压罐+进排气阀、箱式双向调压塔+进排气阀两种水锤防护方案。工程结果表明,对于气压罐+进排气阀方案,集水干管前面部分管段和部分连接管仍有一部分管道压力超出管道承压值,存在一定的安全隐患;箱式双向调压塔+进排气阀方案,集水干管和各井连接管的水锤最大压力均控制在管道承压值之下,管道的安全运行得到了保障。

关键词: 傍河多井水源系统; 水锤; 事故停泵; 水力过渡过程; 箱式双向调压塔; 进排气阀; 气压罐

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2022)13-0051-08

Simulation of Water Hammer in Riverside Multi-well Water Source System and Its Protection

LEI Chun-yuan¹, YANG Rui-hu^{2,3}, WANG Wei^{2,3}, SHANG Yu-jun^{2,3},
WANG Tong^{2,3}, WU Rong-chu^{2,3}, LIU Yong-jia¹

(1. Xi'an Water Supply Co. Ltd., Xi'an 710082, China; 2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 3. Key Laboratory of Water Supply & Sewage Engineering <Ministry of Housing and Urban-Rural Development>, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Riverside multi-well water source system is characterized by multiple pumps, multiple water levels, multiple working conditions, multiple boundary conditions and complex pipeline system. According to basic differential equations and corresponding characteristic line equations for water hammer calculation, the water hammer was simulated in all wells under the condition of simultaneous shutdown of all the pumps at the same time, and two water hammer protection schemes were proposed, namely air pressure tank with intake and exhaust valve and box-type bidirectional pressure regulating tower with intake and exhaust valve. For the scheme of air pressure tank with intake and exhaust valve, the pressure of some pipe sections and some connecting pipes in front of the main pipe still exceeded the pressure value of the pipe, indicating that there were some security risks. For the scheme of box-type bidirectional pressure regulating tower with intake and exhaust valve, the maximum water hammer

pressure of the main pipe and connecting pipe of each well was controlled below the pressure value of the pipeline, indicating that the safe operation of the pipe was guaranteed.

Key words: riverside multi-well water source system; water hammer; pump-stop accident; hydraulic transition process; box-type bidirectional pressure regulating tower; intake and exhaust valve; air pressure tank

1 工程概况

某地区地下水源设计规模为 $2.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 采用水源井群设计, 共有 14 口水源井 (12 用 2 备), 位于黄河漫滩 II 级阶地上, 沿河岸分布, 每口水源井采用集水管相连, 将各井的出水收集输送至水源地区东南部的自来水厂。多水源井布置及管道系统设计如图 1 所示。水源井深为 129 m, 井半径为 200 mm, 水源井类型为潜水完整井。每口水源井设置 1 台井用潜水泵, 采用软启动装置, 井内设静压液位计。1#~14# 水源井的地形标高分别为 168.328、163.770、162.568、157.107、150.486、164.539、160.389、162.789、163.163、159.517、162.196、159.888、156.964、158.297 m, 水厂地形标高为 160.590 m。集水管采用钢管, 管道直径为 DN200~600, 管道自西北向东南呈枝状铺设然后接入水厂。由于多水泵、多水位、多工况、边界条件和管道形式复杂等特点, 使得其水力过渡过程计算分析的难度相较于普通的长距离输水管道的水锤模拟计算分析要大得多。



图1 傍河多井水源系统设计概况

Fig.1 Design overview of riverside multi-well water source system

目前, 用于压力管道水锤防护的措施主要有气压罐、单向调压塔、恒速缓冲排气阀、蝶式缓闭止回阀和水锤消除器等。李琨等^[1]对空气罐防护设备进行水锤防护计算分析, 并提出了防护设备相关参数的优化方法。徐放等^[2]对空气阀等水锤防护设备进行

行了详细的数值模拟计算, 分析了其在输水管道中对水锤的防护效果。Zhao等^[3]在进行长距离输水管道断流弥合水锤计算及其防护分析和箱式双向调压塔的数值模拟计算时克服了所有上述装置的缺点。此外, 输水管道的顺利排气对管道安全运行也十分重要, 因此进排气阀^[4]的选择也需要重视。

本研究通过工程实例对比了气压罐+进排气阀和箱式双向调压塔^[5]+进排气阀两种水锤防护措施, 对傍河多井水源系统的水力过渡过程进行了计算分析, 旨在为类似工程的水锤防护提供参考。

2 水锤计算模型构建

2.1 傍河多井水源系统水力计算

2.1.1 虚环理论

多井供水管道系统一般布置为树状形式, 为了进行水力计算时的流量校正, 需要应用虚环理论将其构建为环状管网形式。于是, 可以将水泵和多水源井相互影响的关系分别等效为特定的管段, 然后将这些虚管段连接起来构成虚环, 如此不仅可以解决水源井动水位及相互影响的问题, 而且可以将多水源管网转化为单水源管网, 然后根据一般管网水力计算的流量校正公式进行计算。如图 2 所示, 将 4 个水源井通过虚管段相连, 便将原树状管网转化为共有 3 个虚环的环状管网。

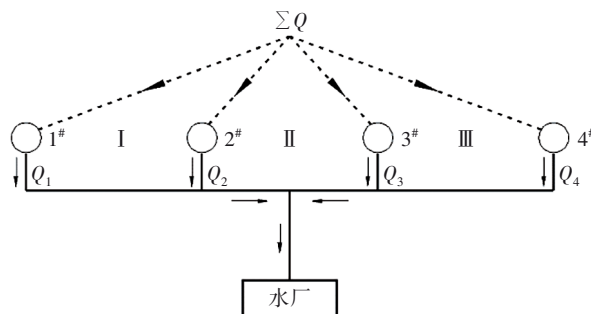


图2 多井供水管道系统虚环示意

Fig.2 Schematic diagram of virtual ring of multi-well water supply pipeline system

可以将水泵等效为一段对水流进行加压的虚

管段,管道特性曲线就是水泵的特性曲线:

$$H_p = H_{p0} - S_p Q_p^2 \quad (1)$$

式中: H_p 为水泵实际扬程, m (1 m 水柱产生的压力约为 9.8 kPa, 下同); H_{p0} 为水泵虚总扬程, m; S_p 为水泵体内虚阻耗系数, h^2/m^5 ; Q_p 为水泵流量, m^3/h 。

对 12 口地下水井群 (1#~12# 水源井) 采用虚环理论, 使用虚管段连接为虚环, 用来计算井群稳态时的节点流量。

2.1.2 各环连续校正法及计算结果

应用虚环理论将水泵和井内动水位等效为连接到一个水源的特定虚管段, 原多水源井树状管网便可以转化为单水源的一般环状管网, 然后便可以根据环状管网水力计算的方法进行计算。根据管网各环连续校正法, 每次迭代计算只进行本环内的流量校正而不考虑邻环的影响, 因此可以不受邻环较大 s_q 值 (摩阻与流量的乘积) 的虚管段的影响, 环内收敛性更好。管网各环连续校正法计算步骤如图 3 所示。

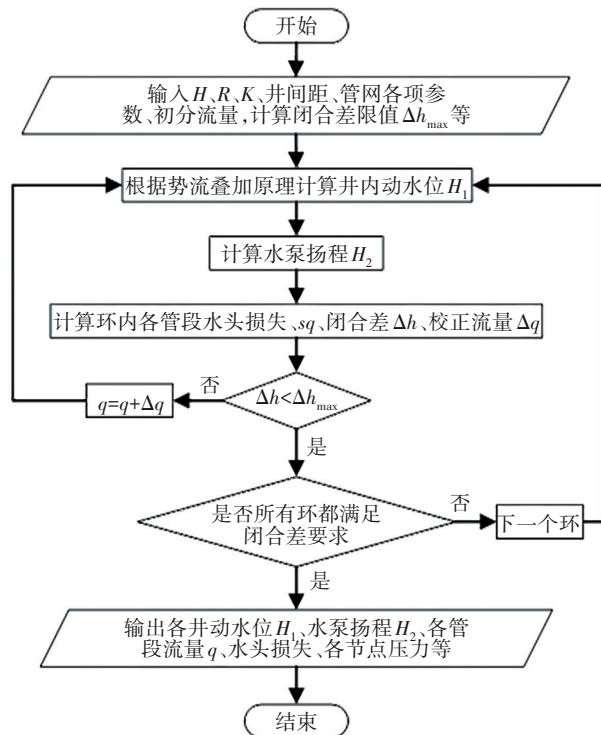


图3 管网各环连续校正流程

Fig.3 Flow chart of continuous correction for each ring of pipe network

因为水锤计算是在管道稳态运行计算的基础上进行的, 所以根据以上水源井水位、出水量以及管道系统水力计算方法编写的稳态运行计算程序,

可作为子程序嵌入到水锤计算程序中, 完善水锤计算的基础条件。

最终, 采用各环连续校正法进行虚环平差的各虚环闭合差均小于 0.000 1 m, 大环的闭合差为 -0.000 3 m, 满足计算精度的要求。

2.2 水锤计算的特征线法

水锤瞬态计算的数值解, 以水锤特征线法 (MOC) 为基础, 采用自编 C 语言水锤分析软件, 对管道水锤进行仿真计算。

其计算的特征线方程为:

$$C^+ \begin{cases} \frac{dH}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} + \frac{af}{2gD} V|V| = 0 \\ \frac{dx}{dt} = a \end{cases} \quad (2)$$

$$C^- \begin{cases} \frac{dH}{dt} - \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} - \frac{af}{2gD} V|V| = 0 \\ \frac{dx}{dt} = -a \end{cases} \quad (3)$$

式中: D 为管道直径, m; H 为管路中微小流体的水头, m; f 为沿程损失系数; t 为水锤波传播时间, s; x 为位置坐标, 指向阀门方向为正, m; V 为流体流速, m/s; a 为水锤波速, m/s。

对以上两个方程沿特征线进行积分和变换, 得到水锤计算的相容性方程^[6]:

$$\begin{cases} C^+: & H_p = C_p - B_p Q_p \\ C^-: & H_p = C_M + B_M Q_p \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$C_p = H_R + Q_R [B - R|Q_R|(1 - \mu)] \quad (5)$$

$$C_M = H_B + Q_B [(1 + k_2)B - R|Q_B|] \quad (6)$$

$$B_p = B + \mu R|Q_R| \quad (7)$$

$$B_M = (1 + k_1)B \quad (8)$$

$$B = \frac{a}{gA} \quad (9)$$

$$R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \quad (10)$$

式中: H_p 为待求时段未知参数 P 的水头, m; Q_p 为待求时段未知参数 P 的流量, m^3/s ; C_p 、 C_M 、 B_p 、 B_M 为综合参数; B 为特征阻抗; R 为管道特性参数; μ 、 k_1 为线性常数; x 为位置坐标, 指向阀门方向为正, m; g 为重力加速度, m/s^2 ; H_B 、 H_R 为管路中微小流体的水头, m; f 为沿程损失系数; D 为管道直径, m; A 为管道

横截面积, m^2 。

于是根据供水系统的稳态运行工况及各种边界条件,运用计算机进行迭代运算,便可进行水力过渡过程的计算分析。

2.3 箱式双向调压塔边界条件

流向由管道到调压塔的流量为正:

$$Q_{\lambda} = \sqrt{2g(H_D - H_0)} \quad (11)$$

流向由调压塔到管道的流量为负:

$$Q_{\text{出}} = -\sqrt{2g(H_0 - H_D)} \quad (12)$$

当 $H > H_x = H_0 + h_1$ 时, $H = H_x$ 。

当 $H < H_z = H_h + h_2$ 时, $H = H_z$ 。

当 $H_z < H < H_x$ 时,调压塔不动作。

式中: H_0 为箱式双向调压塔的原有水头, m ; H_D 为动作后水头, m ; H_0 为安全动作水头, m ; H_x 为泄压值, m ; H_h 为管道中心线标高, m ; H_z 为注水压力, m ; H 为管内压力, m ; h_1 、 h_2 为安全动作水头。

2.4 气压罐边界条件

气压罐边界条件见式(13)~(15)。

$$(H_3 - Z + \bar{H})(V - \frac{Q_{3,i-1} + Q_{3,i}}{2} \Delta t)^n = C \quad (13)$$

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \quad (14)$$

$$H_1 = H_2 = H_3 + \xi Q_3 |Q_3| \quad (15)$$

式中: Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分别为上游、下游、流进气压罐的管道流量; H_3 为管道上的在气压罐位置的测压管水头, m ; Z 为管中心线与气压罐里水位的高差, m ; V 为气压罐体积, m^3 ; \bar{H} 为大气压, m ; n 为气体可逆多变指数; C 为常数; ξ 为损失系数。

2.5 水锤模拟计算程序

由于水力过渡是一个瞬变的复杂过程,对其模拟计算需要进行大量的迭代计算,故需要利用计算机编程进行运算。

首先,根据工程实际确定管道的详细参数及相关附件设施的边界控制条件;其次,应用相关水力学原理进行稳态模拟计算,确定管道系统的稳态运行参数。

再次,在管道系统稳态运行的基础上,根据各边界控制条件在暂态过程中的变化特性对管道系统的影响,进行逐时间层逐节点的循环迭代运算,直至得出需要的计算结果。

图4为一般管路的水锤模拟计算程序,复杂管路也可以根据工程实际在此基础上添加相关边界

控制条件进行计算。

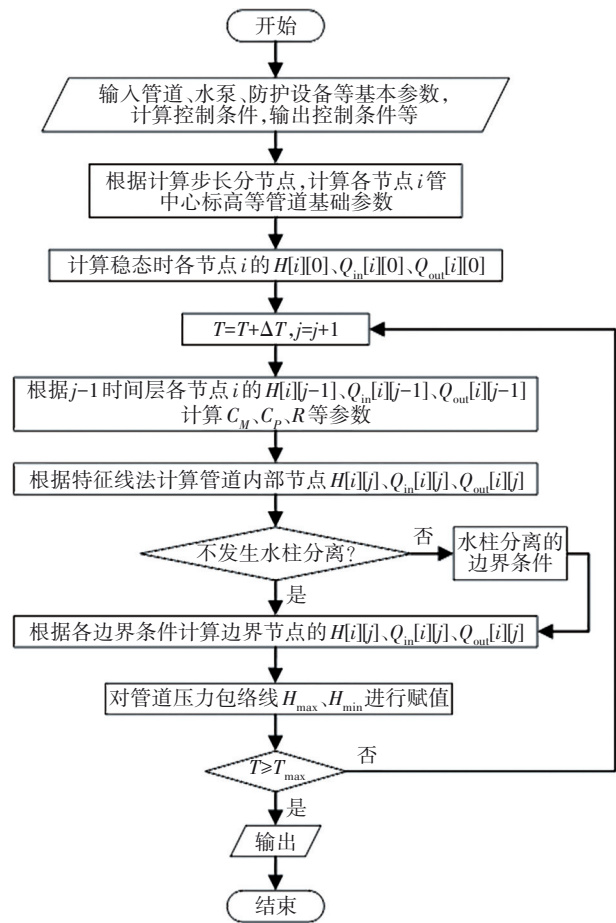


图4 水锤模拟计算程序

Fig.4 Water hammer simulation program

3 水锤模拟分析计算及防护措施

3.1 水锤计算模型的构建

3.1.1 管路系统

以10 m为步长对傍河多井水源系统的管道进行数值离散处理,采集每个计算节点的相关管道参数及水力参数。以1#水源井为起点将其桩号设置为0,沿着集水干管至水厂的顺序依次设置桩号,然后再分别对2#~12#水源井的集水连接管以连接点至水源井的顺序进行桩号设置。各管段的桩号设置如表1所示(由于13#、14#水源井未运行,故其对应集水连接管不参与计算)。

然后便可根据表1所示桩号对各管段每个计算节点进行管中心标高、管材、管径、管道摩阻^[7]等相关参数的提取,以及预留流量、压力等相关水力参数的数据储存空间,为相关管道设备数值化计算模型的嵌入以及模拟计算提供基础。

表1 多井水源系统各管段桩号设置
Tab.1 Pile number setting of pipe section in
multi-well water source system

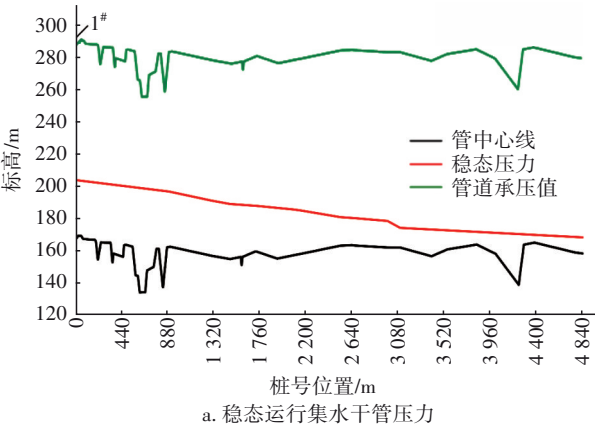
管段 序号	管段前后 节点	桩号设置/m	管段 序号	管段前后 节点	桩号设置/m
1	1#—1	0~480	13	2#—1	4 850~4 860
2	1—2	480~900	14	3#—2	4 870~4 880
3	2—3	900~1300	15	4#—3	4 890~4 900
4	3—4	1 300~1 480	16	5#—4	4 910~5 290
5	4—5	1 480~1 730	17	6#—5	5 300~5 430
6	5—6	1 730~2 080	18	7#—6	5 440~5 550
7	6—7	2 080~2 150	19	8#—7	5 560~5 790
8	7—8	2 150~2 530	20	9#—8	5 800~5 870
9	8—9	2 530~2 670	21	10#—9	5 880~6 260
10	9—10	2 670~2 980	22	11#—10	6 270~6 310
11	10—11	2 980~3 100	23	12#—11	6 320~6 640
12	11—水厂	3 100~4 840			

3.1.2 控制设备

控制设备主要包括12台水泵机组及其相关控制阀门。由前述可知,12个运行的水源井,1#的节点标高最大,为168.328 m,5#的节点标高最小,为150.486 m,水源井的节点标高相差较小,只有17.842 m,故可以选择同一种型号的泵。选用的水泵为高扬程深井潜水泵,型号为200QJ80-88,其上部装有止回阀,可以避免停机水锤造成的机组破坏。水泵机组的详细性能参数如下:流量为80.0 m³/h,扬程为88 m,轴功率为26.8 kW,泵效率为75%,转速为2 850 r/min,电机功率为37 kW,转动惯量为0.246 5 kg·m²,飞轮力矩为10.628 8 N·m,比转速为260。水泵的特性曲线方程式为:

$$H_p = 144.3846 - 0.0093067Q_p^2 \quad (16)$$

式中: H_p 为水泵扬程,m; Q_p 为水泵流量,m³/h。



3.1.3 调节设备

调节设备为傍河多井水源系统中根据管道运行状态变化而进行相关动作的设备,包括普通进排气阀和其他相关防护设备等。该工程实例未进行水锤防护前普通进排气阀安装位置及规格参数如下:位置桩号30 m,原始普通进排气阀公称直径为40 mm;位置桩号250 m,公称直径为40 mm;位置桩号490 m,公称直径为50 mm;位置桩号780 m,公称直径为50 mm;位置桩号910 m,公称直径为60 mm;位置桩号1 580 m,公称直径为80 mm;位置桩号1 720 m,公称直径为80 mm;位置桩号2 640 m,公称直径为100 mm;位置桩号3 830 m,公称直径为120 mm;位置桩号4 770 m,公称直径为120 mm。

普通进排气阀采用CARX复合式排气阀,公称压力为1.0~1.6 MPa,适用温度为0~100℃,法兰标准为GB/T 17241.6—2008,实验标准为GB/T 13927—2008,公称通径在DN40~200时为法兰连接,其阀体和阀盖材质为球墨铸铁,浮球和杆架材质为不锈钢,杠杆和塞头材质为铝青铜。恒速缓冲排气阀为QSP型全压高速双口恒速缓冲排气阀,公称压力为1.0~2.5 MPa,适用温度为-5~80℃,法兰标准为GB/T 17241.6—2008,实验标准为GB/T 13927—2008,阀门口径为DN15~300,连接方式为内螺纹连接,其阀体和阀盖材质为球墨铸铁,浮球和杆架材质为铸钢,杠杆和塞头材质为黄铜。

3.2 全部水源井稳态运行工况分析

输水管道为螺旋钢管,实验测得其承压值为1.2 MPa,稳态运行工况下集水干管及各井连接管的管道压力见图5,各管段水力坡度见表2。

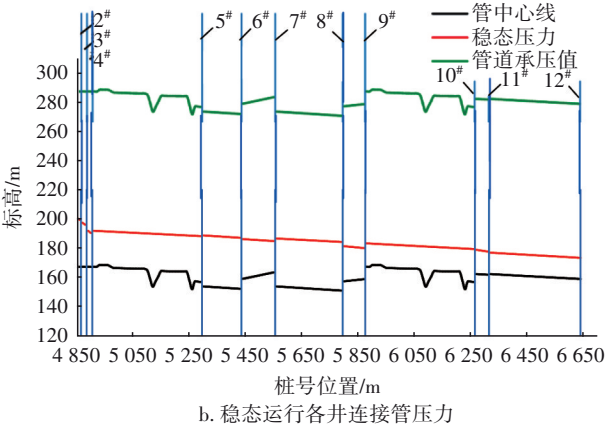


图5 稳态运行时集水干管和井连接管压力

Fig.5 Pressure of collecting main pipe and connecting pipes in each well with steady running

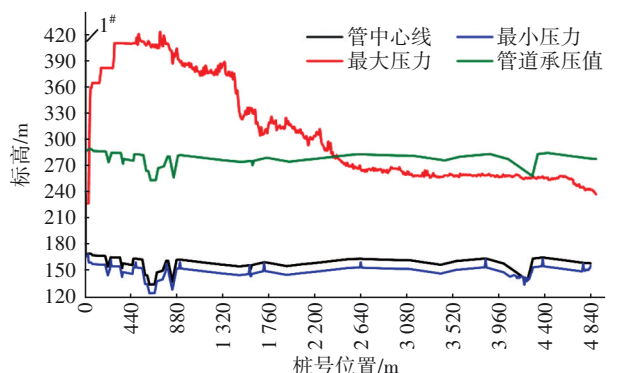
表2 各管段水力坡度计算

Tab.2 Calculation of hydraulic gradient of each pipe section

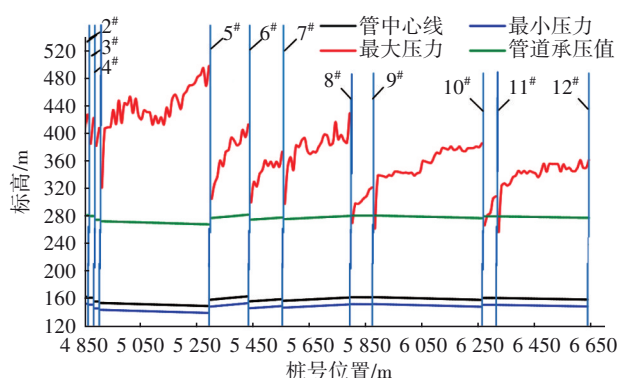
管段	水力坡度 J	管长/m	水头损失/m	管段	水力坡度 J	管长/m	水头损失/m
1#—1	0.006 2	480	2.993	1—2	0.008 0	420	3.376
2#—1	0.069 8	10	0.698	2—3	0.013 9	400	5.547
3#—2	0.070 8	10	0.708	3—4	0.011 8	180	2.128
4#—3	0.074 2	10	0.742	4—5	0.004 4	250	1.111
5#—4	0.009 6	380	3.653	5—6	0.006 4	350	2.229
6#—5	0.012 5	130	1.625	6—7	0.009 4	70	0.657
7#—6	0.016 5	110	1.814	7—8	0.010 9	380	4.154
8#—7	0.010 4	230	2.389	8—9	0.004 5	140	0.632
9#—8	0.018 8	70	1.319	9—10	0.005 5	310	1.706
10#—9	0.010 3	380	3.897	10—11	0.007 1	120	0.856
11#—10	0.028 0	40	1.121	11—水厂	0.003 4	1 740	5.883
12#—11	0.010 9	320	3.484				

3.3 全部水源井同时停泵水锤计算分析

为了评估系统的安全性以及进行相关的防护措施,往往较为关注的是最不利工况的计算分析。本研究认为该工程实例由于事故断电引起的全部水源井同时事故停泵的工况为最不利工况,故针对该工况进行了水锤模拟计算分析,计算结果见图6。



a. 集水干管水锤压力包络线



b. 各井连接管水锤压力包络线

图6 全部水源井同时停泵水锤模拟计算

Fig.6 Water hammer simulation calculation of all water source wells with stop pump at the same time

由图6可以看出,全部水源井同时停泵,潜水泵

的缓闭止回阀快关3 s、快关70°、总关时间为12 s的工况下:集水干管前半段管道的水锤最大压力较高,然后自上游向下游逐渐降低,桩号50~2 340 m管段的水锤最大压力超出了管道承压值,其中集水干管压力最大值发生于桩号640 m处,管道压力值为423.27 m。各井连接管大部分管段的水锤最大压力均超出了管道承压值,接近与干管的交点处时,存在明显的压力衰减现象,连接管的压力最大值发生于5#连接管的桩号5 290 m处,即5#水源井缓闭止回阀下游端,管道压力值为500.01 m。另外,集水干管及各水源井连接管的大部分管段均产生了明显的-10 m的断流负压。

综上可知,在全部水源井同时停泵的最不利工况下,各连接管由于发生断流弥合水锤而产生了较大的升压,但因为干管对连接管的水锤现象具有缓冲削减作用,故干管的水锤最大压力较连接管低。该工况下,干管的前半段和大部分的连接管的水锤最大压力均超出了管道承压值,故该多井水源系统存在极大的安全隐患。

3.4 水锤防护措施

3.4.1 普通进排气阀和恒速缓冲排气阀的设置

由全部水源井同时停泵的水锤计算结果可以看出,在水源井发生事故停泵时连接管的水锤现象较为明显且易发生断流弥合水锤,危害较大。但由于傍河多井水源系统中连接管数量较多,在连接管上安装气压罐、调压塔等防护设备并不现实,而且在该工程实例的初始设计中连接管上并未设置进排气阀,故考虑在连接管上安装恒速缓冲排气阀。由于1#、2#、5#、6#、8#、10#、12#连接管产生的负压现象

较为明显,水锤升压也较大,更容易出现水柱断流,故应将其作为主要防护管段。另外集水干管桩号160~1 000 m管段由于地形起伏较大,其产生的负压以及断流弥合水锤也较为明显,多个工况的干管压力最大值都发生于该管段,同样应该作为重点防护管段。然后再因为1#、2#连接管较短且其与干管的交点处附近已设置有普通进排气阀,故不需再加设恒速缓冲排气阀。综合考虑,拟于5#、6#、8#、10#、12#连接管上加设恒速缓冲排气阀,并将集水干管桩号160~1 000 m管段的普通进排气阀换成恒速缓冲排气阀。

以下水锤防护计算中普通进排气阀的安装位置及规格参数设置如下:位置桩号30 m,普通进排气阀公称直径为40 mm;位置桩号1 580 m,公称直径为80 mm;位置桩号1 720 m,公称直径为80 mm;位置桩号2 640 m,公称直径为100 mm;位置桩号3 830 m,公称直径为120 mm;位置桩号4 770 m,公称直径为120 mm。

以下水锤防护计算中,恒速缓冲排气阀的安装位置及规格参数设置如下:位置桩号250 m,恒速缓冲排气阀进气孔径为20 mm、排气孔径为2.0 mm;位置桩号490 m,进气孔径为25 mm、排气孔径为2.5 mm;位置桩号780 m,进气孔径为25 mm、排气孔径为2.5 mm;位置桩号910 m,进气孔径为30 mm、排气孔径为3.0 mm;位置桩号5 280 m,进气孔径为20 mm、排气孔径为2.0 mm;位置桩号5 420 m,进气孔径为20 mm、排气孔径为2.0 mm;位置桩号5 780 m,进气孔径为20 mm、排气孔径为2.0 mm;位置桩号6 250 m,进气孔径为20 mm、排气孔径为2.0 mm;位置桩号6 630 m,进气孔径为20 mm、排气孔径为2.0 mm。

于是,便可得到气压罐+进排气阀、箱式双向调压塔+进排气阀两个水锤防护方案,以下将对这两个水锤防护方案进行水锤模拟计算分析。

3.4.2 气压罐+进排气阀方案

该水锤防护方案中,于集水干管桩号1 460 m处设置气压罐,然后针对全部水源井同时事故停泵的最不利工况进行了水锤模拟计算分析,计算结果如图7所示。可以看出,采用气压罐+进排气阀的水锤防护方案时,全部水源井同时停泵,在潜水泵的缓闭止回阀快关3 s、快关70°、总关时间为12 s的工况下:由于干管前面部分管段起伏较为剧烈,产生

的断流弥合水锤升压较高,有部分管道压力超出了管道承压值,其中干管压力最大值发生于桩号630 m处,管道压力为290.03 m;另外7#、9#、11#连接管由于未设置进排气阀,水锤升压也较为明显,同样有部分管道压力超出了管道承压值,其中连接管压力最大值发生于7#连接管的桩号5 550 m处,管道压力为286.16 m,管道仍存在一定的安全隐患。

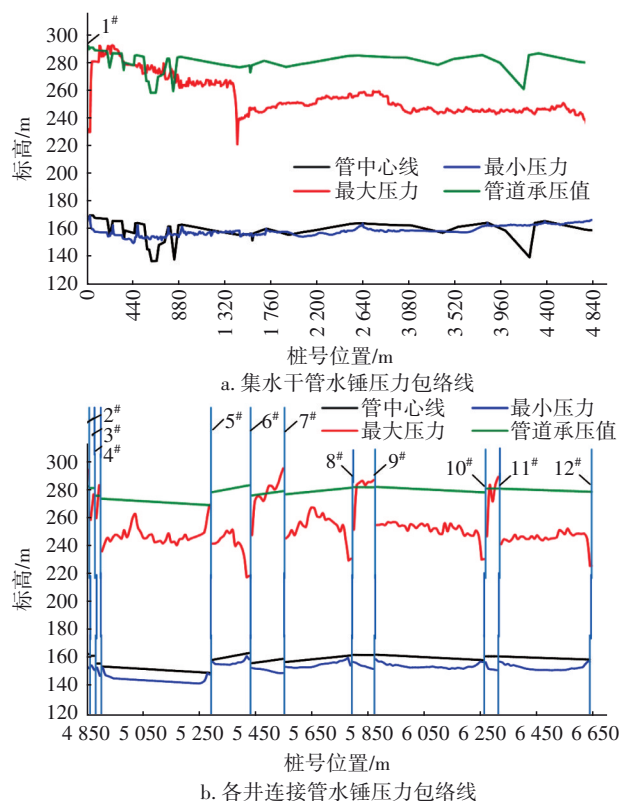


图7 气压罐+进排气阀方案水锤模拟计算

Fig.7 Water hammer simulation calculation for air pressure tank + intake and exhaust valve

3.4.3 箱式双向调压塔+进排气阀方案

该水锤防护方案中,同样在进排气阀设置的基础上,于集水干管桩号1 460 m处设置箱式双向调压塔,然后针对全部水源井同时事故停泵的最不利工况进行了水锤模拟计算分析,结果见图8。可知,采用箱式双向调压塔+进排气阀的水锤防护方案时,全部水源井同时停泵的工况下:干管压力最大值发生于桩号620 m处,管道压力为266.19 m,连接管压力最大值发生于5#连接管的桩号5 290 m处,管道压力为266.41 m,集水干管和各井连接管的水锤最大压力均被控制在管道承压值以下。多井水源系统工程实例在箱式双向调压塔+进排气阀的水锤防护方案下,管道的安全运行得到了保障。

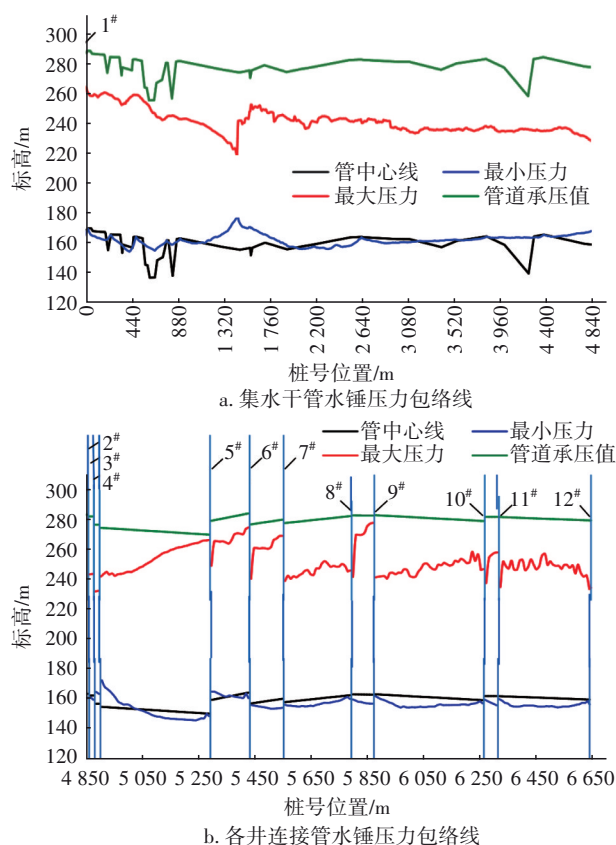


图8 箱式双向调压塔+进排气阀方案水锤模拟计算

Fig.8 Water hammer simulation calculation of box-type bidirectional pressure regulating tower + intake and exhaust valve

4 结论

某傍河多井水源系统,在全部水源井同时事故停泵的最不利工况下,干管和连接管的最大管道压力分别为423.27、500.01 m,水锤升压较大,管道超压较严重。采用箱式双向调压塔+进排气阀的水锤防护方案,干管和连接管的最大管道压力分别为266.19、266.41 m,有效地将所有管道的水锤升压控制在承压值以下,保障了管道安全运行。

参考文献:

- [1] 李琨,吴建华,孙一鸣,等. 空气罐敏感性参数对泵站水锤防护效果研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(3): 127-130.
- LI Kun, WU Jianhua, SUN Yiming, *et al.* Research on the effect of air tank sensitivity parameters on water hammer protection of pumping station [J]. Yellow River, 2021, 43(3): 127-130(in Chinese).

- [2] 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).
- [3] ZHAO L, YANG Y S, WANG T, *et al.* Study on judgment and calculation method of two water column separation water hammer [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 208: 012118.
- [4] 武清,张金承. 具缓冲功能进排气阀解决管道气阻流量偏小问题的实践研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(增刊2): 97-100.
- WU Qing, ZHANG Jincheng. Practical research on the buffer function of inlet and exhaust valve to solve the problem of small gas resistance and flow rate in pipeline [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(S2): 97-100(in Chinese).
- [5] 黎丹. 双输水管设置连通管的数量对水锤影响分析[D]. 西安:长安大学, 2018.
- LI Dan. The Influence of Number of Connected Pipes on Double Water Pipes on Water Hammer [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018(in Chinese).
- [6] 王彤,赵永亮,石存杰. 叠压供水方式下支管管径对干管水锤影响[J]. 水电能源科学, 2020, 38(7): 117-121.
- WANG Tong, ZHAO Yongliang, SHI Cunjie. Influence of branches diameter on main pipe water hammer under superposed supply [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(7): 117-121(in Chinese).
- [7] 黄智刚. 长距离曲线岩石顶管技术用于供水管道建设[J]. 中国给水排水, 2020, 36(20): 39-44.
- HUANG Zhigang. Application of long-distance curved pipe jacking for crossing rock formation in water supply pipeline construction [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(20): 39-44(in Chinese).

作者简介:雷春元(1967-),男,陕西西安人,硕士,高级工程师,研究方向为城市供水系统及水处理技术。

E-mail: 1132783858@qq.com

收稿日期: 2021-04-15

修回日期: 2021-06-01

(编辑:任莹莹)