

长距离重力流压力输水工程水锤防护设计探讨

赵小利^{1,2}, 高双强¹, 吴 钊¹, 李文奇²

(1. 西安水利规划勘测设计院, 陕西 西安 710054; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘 要: 随着城市用水规模不断扩大, 长距离输水工程日益增多, 水锤引起的爆管严重影响了长距离压力输水工程安全。为解决李家河水库输水工程因管线长、地面起伏大而发生水锤破坏可能性的问题, 进行管道分段、阀门选择、运行控制等多种措施综合设计, 并采用特征线法进行数值模拟计算, 有效保障压力输水工程安全。提出长距离重力流压力输水管道水锤防护需从工程手段、技术措施、运行管理等多方面分析, 综合制定水锤防护方案, 消除水锤对工程安全的影响。

关键词: 长距离重力流压力输水; 工程安全; 水锤防护; 管道分段; 技术措施; 运行控制

中图分类号: TV672

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)03—0088—04

Discussion on Design for Water Hammer Prevention in Long Distance Water Conveyance with Gravity and Pressure

ZHAO Xiao-li^{1,2}, GAO Shuang-qiang¹, WU Zhao¹, LI Wen-qi²

(1. Xi'an Planning and Investigation and Design Institute of Water Conservancy, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038 China)

Abstract: With the expanding of urban water consumption, the long distance water conveyance project is increasing day by day, and the project safety is seriously threatened by water hammer. In order to solve the water hammer damage in Li-jiahe Reservoir's water conveyance project because of its long distance pipeline and fluctuating ground, such the measures as pipeline segmentation, valve selection, operation control and so on are adopted for the integrated design of water hammer prevention, and the characteristics method is used for the numerical simulation and calculation, effectively protecting the project safety. Through the systematic analyses for project methods, technical measures and operation guidance, the prevention design for the water hammer damage is made so as to eliminate the water hammer influence on project security.

Keywords: long distance water conveyance with gravity and pressure; project safety; water hammer prevention; pipeline segmentation; technical measure; operating control

长距离输水管(渠)道工程, 是距离超过 10 km 的用管(渠)道输送原水、清水的建设工程^[1]。由于重力流压力管道输水具有节约能源、水质不易被污染、漏损小, 线路布置灵活、节约土地资源等优点而成为长距离输水方案的首选, 但管线长、地面起伏大的压力输水管道发生水锤破坏的机率增大。水锤是影响长距离压力输水工程安全运行的一个重要因素, 不少工程因水锤而引起爆管, 产生了严重的经济损失^[2]。城市供水保证率要求高, 供水安全问题被

社会广泛关注, 做好水锤防护是保障长距离压力管道工程安全的关键。目前基于特征线法的水力过渡过程数值计算被应用于长距离压力输水工程水锤防护研究, 对不同边界条件、不同运行工况进行的数值模拟研究成为有效的水锤防护分析手段。本文以李家河水库长距离重力流压力输水工程为例, 说明水锤防护设计需要从工程措施、技术措施、运行管理多方面综合考虑, 并首先考虑工程措施的设计思路, 以供类似工程参考。

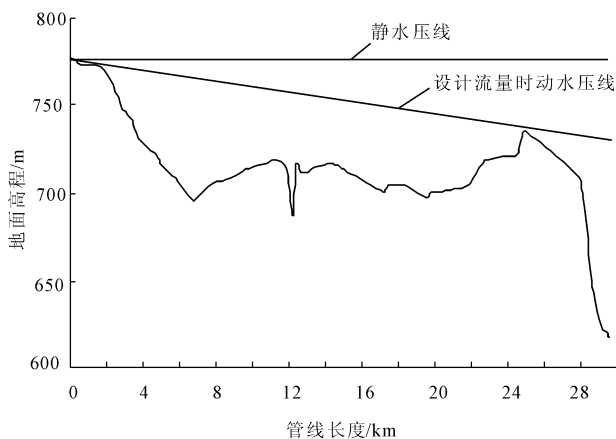
1 工程概述

1.1 工程基本情况

李家河水库输水管道工程位于秦岭北麓山前过渡塬区,管线长 30.12 km,设计流量 $3.0 \text{ m}^3/\text{s} \sim 2.85 \text{ m}^3/\text{s}$,重力流压力输水,管线首端地面高程 780.8 m,末端地面高程 621.3 m,总高差 159.5 m。本工程总水头差较大,但大部分落差集中在管道末段,管道出口富余水头大;前半段管道大部分处于低洼地段,运行中承受的静水压力较大;管道后段地形较高部位易出现负压。管道分段分压分别采用 DN1600 预应力钢筋混凝土管(PCP)、预应力钢筒混凝土管(PC-CP)及 DN1400 球墨铸铁管。

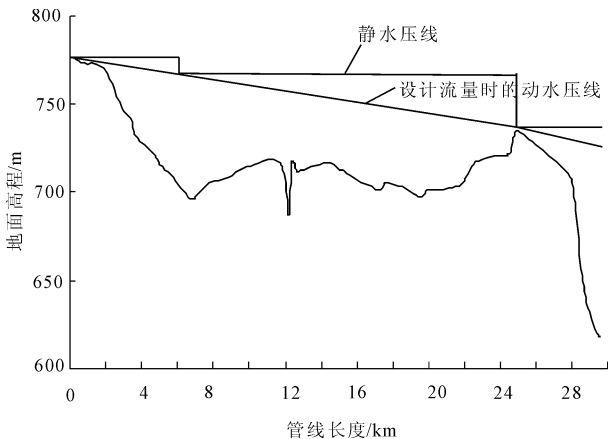
1.2 管道运行水压与优化

输水工程管道进出口总高差 159.5 m,设计流



(a) 不减压时管道水压线

量运行时,大部分管段内压超过 90 m 水柱,如图 1(a)。当内压超过 80 m 水柱时,管道连接处易出现故障,影响整体安全。根据技术规范要求,管道公称压力应根据最大使用压力确定,一般为最大使用压力加 0.2 MPa ~ 0.4 MPa,重力流输水管道最大使用压力为静水压力^[1]。管道优化以降低正常运行水压提高工程安全性为主,兼顾降低管材耐压等级减小工程造价;还可减少漏失水量,对于本工程湿陷性黄土地层更有利于管道安全。为有效减小管道多余水头、降低静水压力,拟在管线前段低洼点(6+000)安装减压阀、在后半段制高点(27+700)设减压池减压,输水管纵断面及水压线如图 1(b)。由该图可见:6+000 处减压阀可降低管道静水压力 15 m 水柱;27+700 处减压池可降低静水压力 50 m,同时有利于防止下游管道出现负压。



(b) 6+000 设减压阀、27+700 设减压池时水压线

图 1 设计流量时管道水压线

2 水锤防护分析计算

2.1 水锤计算的特征线法

压力管道进行水锤分析,通常采用特征线法。特征线法物理概念明确,便于应用计算机编程计算分析,可以处理较复杂的边界条件,且容易满足数值计算的收敛条件。特征线法是一种数值计算方法,其主要思路是将以偏微分方程形式表示的水锤方程组,转化为在特征线上的常微分方程,然后采用有限差分数值计算^[3-4],即

$$C^+ : H_p = H_A - B(Q_p - Q_A) - R Q_A | Q_A | \quad (1)$$

$$C^- : H_p = H_B + B(Q_p - Q_B) + R Q_B | Q_B | \quad (2)$$

其中: $B = a/gA$, $R = f\Delta x/(2gDA^2)$

式中: H_p 、 Q_p 分别为计算断面 i 在 t 时刻的水头和流量; H_A 、 Q_A 分别为断面 $i-1$ 在 $t-\Delta t$ 时刻的水头和流量; H_B 、 Q_B 分别为断面 $i+1$ 在 $t-\Delta t$ 时刻的水头

和流量; D 、 A 、 f 分别为管道直径、过水断面面积和摩阻系数; a 为水锤波速; Δx 为水锤分析管道分段长度; g 为重力加速度。

当各点初始状态时的 Q 、 H 值和边界点的条件方程已知时,就可根据前一时段 t_0 时刻已知的 Q 、 H 值,求出后一时段 $t_0 + \Delta t$ 时的 Q 、 H 值。水锤计算是对整个输水管道系统进行计算分析,包括管道内点及与管道连接的水池、阀门及其它过流元件。对于所有内结点就用上述方法计算,对于进出口水池、各种阀门等特殊边界点的瞬时 Q 、 H 值根据各自不同的边界条件进行计算。

2.2 不减压方案的末端关阀水锤计算

在桩号 14+885 和 24+683 设超压泄压阀,管道沿线按规定安装排气阀,末端阀匀速关闭,分别将关阀时间设为 600 s、1 200 s 进行计算。由于管线距离长、地形高差起伏大,即使将关阀时间延长到

1 200 s, 管道全线水锤升压依然很大, 远超过管道承压能力, 减压方案不能满足水锤防护要求。

2.3 减压方案(推荐方案)的关阀水锤计算

在桩号 6 + 000 和 27 + 700 分别设置减压恒压阀和减压池, 在桩号 14 + 800 设置超压泄压阀。将减压恒压阀的动作压力设定为管线通过设计流量时的动水压力, 则当减压阀后压力高于该设定值时, 减压阀自动迅速关闭, 直到减压阀后点压力减小到管线设计压力时, 阀门自动打开, 全开状态处于不减压

状态^[5]。同时, 将相应桩号的排气阀换为恒速缓冲排气阀, 末端阀按 300 s、900 s 匀速关闭的管线特征点水锤压力如表 1。由表 1 可知, 不同时间匀速关闭末端阀门时, 最不利点均出现在减压池前端。300 s 关阀时其最大水锤压力为 789.557 m 水柱, 900 s 时其最大水锤压力为 780.664 m 水柱。水锤压力小于管道公称压力即为不超压, 满足水锤防护要求^[1], 末端阀大于 900 s 匀速关闭管道全程不超压。为安全计, 末端阀关闭时间应大于 1 200 s。

表 1 末端阀按 300 s、900 s 关阀管道特征点的压力

单位: m

项目名称	位置					
	减压池前	末端阀前	10.4 km	17.0 km	24.0 km	26.2 km
管轴线高程	725.837	620.200	714.434	702.904	721.126	725.452
正常动水压力	743.210	743.966	766.624	756.072	744.200	740.902
300 s 水锤压力	789.557	750.632	779.918	785.814	789.328	747.980
升压差	46.347	6.666	13.294	29.742	45.128	7.078
900 s 水锤压力	780.664	746.651	777.802	779.359	780.561	746.27
升压差	37.454	2.685	11.178	23.287	36.361	5.368

2.4 减压方案下的开阀水锤计算

减压防护措施同 2.3。初始状态管道充满水, 水体静止, 初始流量为 0, 逐渐开启末端阀门。分别采用 300 s 和 900 s 开启至设计流量。300 s 开阀时, 部分管段的水锤压力超过了设计承压值, 尤其是减压池后较长管段有负压产生。当 900 s 开阀至设计流量时, 整个管线无超压出现。基于工程安全考虑, 建议采用 900 s 以上开阀至设计流量。

对长距离重力流输水管道进行水锤防护时, 用减压水池对管道进行分段或者分级, 往往有很好的效果, 不但技术上易于实现, 而且因为不依赖于人为操控而具有较高的工程可靠性。减压水池将长距离管道分成几个较短的管道, 从而简化输配水条件, 降低水锤发生的可能性。减压水池容积一般可取 5 min 管道最大输水流量。如 1.2 所述, 本工程在 27 + 700 处减压池对长距离管线进行分段。管道分段减压不但能够有效降低管道静水压力降低管材耐压等级和工程造价, 而且能够有效防止地形高点断流弥合水锤的发生。

3 水锤防护措施

根据水锤分析计算结果, 结合管道设计具体情况, 综合制定水锤防护措施。

3.1 工程预防措施——管道分段

从水锤发生的机理和水锤压力计算基本公式可知, 缩短压力管道长度, 使管道进水口反射回来的水锤波能够较早地回到压力管道末端, 从而减小水击压力。在较长的压力管道中, 设置调压室、减压池缩短压力管道是常用的减小水锤压力的措施。重力流压力管道输水工程利用天然地形落差自流输水, 正常运行时测压管水头小于静水头; 当管路上的闸、阀关闭后, 管中最大静水头即为地形最大落差, 落差越大, 管道承受的压力越高, 当闸、阀非正常关闭时, 容易产生较大的水击压力, 造成爆管事故。对于地形起伏大的重力流管路, 在管路高点、转折点易发生断流空腔, 并造成断流弥合水锤^[6]。

3.2 技术防护措施——阀门选择

3.2.1 空气阀

空气阀对防止水锤破坏, 维持输水管道安全运行至关重要, 排气不畅可能产生爆管, 造成严重事故^[7]。空气阀通常装设在管线凸起部位, 当管道内压力低于大气压时吸入空气, 而当管道中压力上升高于大气压时排出空气。由于普通排气阀在一定压力下会突然起球终止排气, 导致断流弥合水锤发生, 使管道升压较高^[8-9], 本工程选择在水气相间流态下能够连续大量排气且缓冲关闭的慢速缓冲排气阀, 安装在管顶, 共设 39 台, 其中 DN300 的 36 台, DN250 的 3 台。

3.2.2 超压泄压阀

超压泄压阀的主要作用是当管道中发生水力瞬

变流,某点的压力过高时,在此点的超压泄压阀自动打开,泄流掉一定流量,维持管道在此点的压力,当压力降到设定安全值后,超压泄压阀再自动关闭。超压泄压阀的泄压值应根据输水管道的最大使用压力和管材强度,经水力计算确定。超压泄压阀的口径宜为主管道直径的 $1/5 \sim 1/4$,或经水力计算确定,泄压值也可采用最大使用压力加 $0.15 \text{ MPa} \sim 0.20 \text{ MPa}$ ^[1]。超压泄压阀设置在末端阀门前,以及管道局部高压处。本工程分别在桩号 $6+838, 12+136, 27+645, 30+120$ 安装超压泄压阀,规格DN600。

3.2.3 减压恒压阀

采用减压恒压阀,可降低管道正常工作压力,降低管材耐压等级,大大减少管道工程造价;减少管道漏失水量,增加了管道系统的安全系数。将减压恒压阀的动作压力设定为管线通过设计流量时的动水压力,则当减压阀后压力高于该设定值时,减压阀自动迅速关闭,直到减压阀后总压力减小到管线设计压力时,阀门自动打开,全开状态处于不减压状态。在无泵管路中,一般减压恒压阀的有效口径与主管道直径相同^[7]。结合管道设计情况在桩号 $6+000$ 及 $28+900$ 处分别设置一台减压恒压阀。

3.2.4 出口控制阀

管道末端富余水头较大,就对出口调节阀提出了较高要求,要求阀门具有良好的减压调流功能。良好的减压调流阀必须具备:①良好的抗气蚀能力;②良好的线性调节特征。传统的闸阀、球阀和蝶阀等均是出色的截断阀,但若用于调节流量或压力时,常会产生严重的振动和噪声,气蚀破坏较大,流量调节特性差。针阀(活塞阀)采用锥形活塞在阀体内部的移动,来达到流量线性调节的功能,并在结构上引导水流在阀体内对撞消能达到减压目的。锥形活塞由阀体内部导轨引导,在流量中作轴向移动,在任何位置活塞的环形节流阀确保其线性操作特性。另外,水流通过节流导流成为高速流体,沿径流向阀体水平中心线而互相撞击,在此处气泡产生和破裂均处于介质流中,由此将气蚀限制在阀体中心,不产生气蚀破坏。本工程选择活塞式调流调压阀(针阀)作为管段末端出口调节阀。

3.3 运行管理措施——阀门开闭操作控制

由于长距离压力输水工程管道起伏大,充水过程水力条件复杂,目前均采用较小的充水流量和较长的充水时间。为了防止管道停运时空管,工程运行过程中大都采用操作管道最末端的阀门,使工程运行或停运。管道末端阀的关闭过程(关闭时间与

角度关系),对水锤压力的影响很大,因此应优化其关闭过程,使得管道的水锤正压不超过管道的承压能力,且应尽可能的小;使管道尽量不产生负压^[2]。控制管道末端阀的关闭时间,使水压波传播趋于平缓,避免压力振荡,降低管道升压,能有效预防因关阀太快引起的直接关阀水锤,消除水锤危害,从而预防爆管事故的发生。另外,管道末端阀门的关闭方式、操作时间以及各种水锤防护设备的正确运行对管道安全意义重大,故根据水锤分析计算制订运行操作规程及对维护管理人员进行培训都是非常重要的。经分析计算,本工程末端阀门采用大于 $1\ 200 \text{ s}$ 匀速关闭和大于 900 s 匀速开启。

4 结 语

对于地面起伏大、富余压力较大的长距离重力流压力输水管道工程,水锤防护设计应首先结合地形条件、水力计算与水锤分析计算情况,研究对管道进行分段减压的工程预防措施;其次应慎重选择空气阀、超压泄压阀、末端控制阀及减压恒压阀等合理布置,这是保障管道安全的重要技术措施;最后应根据水锤分析计算结果,制定操作规程,对末端阀门的关闭及开启过程进行严格控制是消除水锤破坏、保证供水工程安全的重要运行管理措施。

参考文献:

- [1] 中国建设标准化协会. CECS193:2005. 城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程[S]. 北京:中国计划出版社,2005:2.
- [2] 朱满林,沈冰,张言禾,等. 长距离压力输水工程水锤防护研究[J]. 西安建筑科技大学学报,2007,39(1):40-43.
- [3] 金锥,姜乃昌,汪兴华. 停泵水锤及其防护[M]. 第二版. 北京:中国建筑工业出版社,2004:41-45.
- [4] 于必录主编. 水力过渡过程[M]. 北京:水利电力出版社,1984.
- [5] 杨玉思,潘惠民,何青. 供水系统中大型减压阀的作用分析[J]. 中国给水排水,2003,19(7):82-83.
- [6] 杨玉思,李树军,辛亚娟. 长距离大管径重力流输配水管道水锤防护方法探讨[J]. 给水排水,2008,34(10):121-125.
- [7] 倪治斌. 长距离管道输水工程设计探讨[J]. 水科学与工程,2010,(2):86-88.
- [8] 杨玉思,姜巨智,王栋. 有压供水管道气水两相流态及排气方式[J]. 中国给水排水,2005,21(12):62-64.
- [9] 杨玉思,张世昌,付林. 有压供水管道中气囊运动的危害与防护[J]. 中国给水排水,2002,18(9):32-33.