

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.22.015

西安市某引水工程长距离重力输水管道设计

王 俊, 马平安, 崔红军, 赵海亮

(西安水务<集团>规划设计研究院有限公司, 陕西 西安 710082)

摘 要: 西安市某水厂水源长距离输水工程,管道总长为42.5 km,管径为DN2 400。介绍了该输水管道的设计方法,包括管道线路的选择、管径计算、管材选择、水锤分析等。为充分利用水厂与水源的地形高差,通过对管道线路、管径等的比选,实现了长距离重力输水,既保障了管道的输水安全,又节省了工程建设投资和运行成本;结合模型,对末端阀门在不同的关闭时间所模拟的压力包络线进行了分析对比,通过在输水管道沿线设置防水锤空气阀、泄压阀及延长末端阀门关闭时间等水锤防护措施,消除末端关阀水锤和断流弥合水锤,保证了管道的运行安全。

关键词: 长距离引水工程; 重力输水; 水锤分析

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)22-0084-05

Design of Long-distance Gravity Conveyance Pipeline for a Water Diversion Project in Xi'an

WANG Jun, MA Ping-an, CUI Hong-jun, ZHAO Hai-liang

(Xi'an Water Group Planning and Design Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710082, China)

Abstract: In a long-distance water diversion project in Xi'an, the total pipeline length between the water source and the water plant is 42.5 km, and the diameter is DN2 400. The design method of the transmission pipeline such as the selection of the pipeline line, pipe diameter calculation, selection of the pipe material and water hammer analysis were introduced. To make full use of the elevation difference between the water source and the water plant, the long-distance gravity water conveyance was realized through the comparison and selection of the pipeline route and pipe diameter. It not only ensured the safety of water diversion, but also saved the construction investment and operating cost. Combined with the model, the pressure envelope simulated by the end valve at different closing time was analyzed and compared. The end valve closing water hammer and cut-off bridging water hammer were eliminated through the water hammer protection measures such as setting water hammer air valves and pressure relief valves along the water pipeline and prolonging the closing time of the end valve, so as to ensure the operational safety of the pipeline.

Key words: long-distance water diversion project; gravity water conveyance; water hammer analysis

1 工程概况

西安市某水厂位于西安市户县境内,水厂设计规模 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,一期规模 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,已于2016年6月开工建设,目前工程建成投运,一期工程总投资约5.6亿元。原水暂时从现状黑河渠道引

出,黑河引水系统原输水渠道建成以来已安全运行近20年,供水量逐年增加,现已占到全市供水量的70%以上。受现状渠道输水能力的限制,该水厂运行规模仅为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,因此解决该水厂一期工程水源供应问题已变得刻不容缓,该水厂尽快满负荷

运行对缓解西安市供水紧张的局面至关重要。

为满足该水厂一期 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 运行需求,根据相关规范及类似工程经验,并综合考虑水厂自用水量及管道漏损水量,确定本次引水管道设计流量为 $5 \text{ m}^3/\text{s}$,总长度为 42.5 km 。工程总投资约 15.7 亿元,其中工程费用约 11.6 亿元,工程建设其他费用约 2.8 亿元,预备费及贷款利息约 1.3 亿元。该引水工程的建设,对解决水厂一期工程的水源问题,保证水厂的正常运行,充分发挥水厂的投资效益,提高城市供水安全性和保证率,促进西安市经济社会协调、可持续发展具有重要作用。

2 输水管线设计

2.1 取水方案选择

根据相关资料,现状引水渠道蔺家湾汇流池上游石头河水库年供水富余量约为 $8\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、引渭济黑工程年可利用水量约为 $4\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$,此部分富余水资源基本可满足西南郊水厂近期 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 规模的原水需求,引渭济黑工程、石头河水库均已接入现状蔺家湾汇流池,结合本工程的地理位置和水源的关系,确定取水口选择在蔺家湾汇流池。

2.2 输水管道线位选择

汇流池水位高程与水厂总进水井水位高程高差约 22 m ,具有较好的重力输水条件。为充分利用重力输水,输水管道线位选择时,地面高程应小于汇流池水位高程并应小于管道的水力坡降。

长距离输水管道定线是一项复杂、细致的工作,涉及大量的单位和个人,为保证管道定线后的可实施性,建议在定线前,应进行大量的调查和协调工作,避免造成后期频繁改线,影响工期和浪费资源。本工程输水管道起点位于蔺家湾汇流池,沿黑河东岸河堤路自南向北敷设至环山路,然后沿环山公路南侧自西向东敷设至柳泉河,穿越环山公路后沿环山公路北侧农田自西东北敷设,终点接入水厂总进水井,管线沿途穿越公路 3 处、河道 17 处、灌溉干渠 5 处。输水管道平面线位见图 1。



图 1 输水管道平面线位

Fig. 1 Plane line location of water conveyance pipeline

2.3 输水管道条数确定

本工程为长距离输水管道工程,根据《城镇供

水长距离输水管(渠)道工程技术规程》(CECS 193:2005)第 3.1.2 条和《室外给水设计标准》(GB 50013—2018)第 7.1.2 条要求,输水管(渠)道不宜少于两条,当多水源供水或有调节水池或其他安全措施时,也可修建一条输水管(渠)道。该水厂总设计规模为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,近期来自黑河水库和石头河水库($40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),二期来自引汉济渭($60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),目前水厂已经建成来自现状黑河引水渠道取水设施($20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),可利用现状渠道满足已建成设施的水源需求,三路供水线路能够满足事故状态的供水要求,相当于多水源供水系统,按照规范要求并考虑工程实施的难易程度及投资,本工程采用单条管道输水。

2.4 管径确定

本工程汇流池水位与水厂总进水水位高差约 22 m ,具有重力输水的条件,优先考虑采用重力输水方式,根据长距离重力输水项目的工程经验,经济流速采用 1.0 m/s ,管径采用 DN200、DN240、DN260 进行试算,根据《室外给水设计标准》和《城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程》,本次水力计算采用谢才公式,为确保计算的准确性,采用海澄-威廉公式进行校核,输水管道水力计算结果见表 1。

表 1 输水管道水力计算结果

Tab. 1 Hydraulic calculation results of water conveyance pipeline

管径 d/mm	DN200	DN240	DN260
流速 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.32	1.1	0.94
沿程损失 h_f/m	23.6	14.9	9.8
局部损失 h_j/m	5.4	4.1	3.3
水头损失 h_z/m	29	19	13.1

由表 1 可知,管径为 DN200 时,管道总水头损失为 29 m ,大于 22 m ,不能实现重力输水要求;管径为 DN260 时,管道总水头损失为 13.1 m ,但总造价较高;管径为 DN240 时,管道在满足水头损失要求的条件下管径最小,故本工程设计管径采用 DN240。

2.5 管材选择

长距离输水工程管材的选择应充分考虑管径、管压、地质条件、运行条件、当地管材的生产状况、应用管材的习惯,并进行技术、经济、安全等的综合比较后确定^[1]。本工程引水管道敷设于北麓山前洪

积扇,地质状况良好,管道主要沿环山路布置,交通便利,沿途穿越河流、公路、干渠等。拟选管道管径为 DN2 400,管道压力 1.0 MPa,管道敷设区域为 8 度设防区域,拟选管材应具有较好的延性或者采用承插式连接的管道,接头填料宜采用柔性材料,根据类似工程和《室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范》(GB 50032—2003)、《城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程》的要求,可应用于本工程的管道主要有球墨铸铁管(DIP)、预应力钢筒混凝土管(PCCP)、钢管(SP)等。可选管材的综合造价对比见表 2。

表 2 管道综合造价对比

Tab. 2 Comparison of pipeline comprehensive cost

元·m⁻¹

项 目	钢管	球墨铸铁管	预应力钢筒 混凝土管
到工地预算价	10 648	11 255	8 396
管道除锈及防腐			1 600
安装工程费	1 460	1 060	1 800
合计	12 108	12 315	11 796

注: 管道比较均以直径 DN2 400、工作压力 1.0 MPa 计;球墨铸铁管、钢管价格中已包含防腐费用。

综上,虽然预应力钢筒混凝土管费用较低,但是优势不显著,同时工程安全性、可靠性均比球墨铸铁管差,且施工难度、施工速度比球墨铸铁管差,同时本工程为单线引水管道,维护的方便性显得尤为重要,经综合比较后确定采用球墨铸铁管,穿越河道、主要交通干线等特殊部位(过沟等)采用钢管。

2.6 管道附属设施

① 排泥阀设置

根据输水管道敷设坡度,同时考虑检修区段的地形条件,为排除管道中的积泥和在管道出现事故时放空管内积水,在引水管道的适当位置(低凹处)设置排泥放空阀。本工程共设置排泥放空阀 26 个,排水设置采用 DN800 闸阀,泄水时干湿井结合,优先重力排至河道,无法排除时采用潜水泵抽排至渠、沟、河等低凹地带。

② 检修阀设置

根据《城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程》第 5.2.1 条,引水管道每隔 5~10 km 左右及下穿河道、公路、铁路等段,应根据工程的具体情况和有关部门的规定设置阀(闸)门,根据本工程长距离输水的特征,在引水管道终端以及部分特殊地段

设置检修阀门,为减少阀井数量,各类阀井根据地形情况尽量结合布设,检修阀采用手电两用蝶阀,并要求缓缓关,关闭时间≥22.5 min,以减小阀门关闭时产生的水锤压力对管道安全构成的威胁,共设置检修蝶阀 14 个。

③ 排气阀设置

为消除开关阀门引起的管道出现负压和弥合水锤,在输水管线的局部高点及长距离缓坡段每隔 1.0 km 设置排气阀,经计算,排气阀采用 DN300 可满足排气要求,本工程采用复合式排气阀,兼具进气功能,局部高点采用防水锤型排气阀,沿线共设置 44 个排气阀井。

④ 调流调压阀设置

目前常用的调流调压阀主要有多喷孔套筒阀、活塞阀、微电数控液力阀,活塞阀与套筒阀均需高压电源,微电数控液力阀只需弱电控制即可,但其控制精度低、调节范围有限;细砂等杂质易堵塞多喷孔套筒阀的锥形孔,垂直转角易产生局部流态紊乱,从而造成密封不严,引起泄漏;活塞式调流调压阀具有非常大的减压比,其开度与流量呈线性关系,可以实现精确调节,且具有防堵塞的效果。本工程调流阀位于水厂前端,有可靠的电源保证,故确定采用活塞式调流调压阀,在进入水厂总进水井前设置 1 座调流调压阀井。

⑤ 泄压阀设置

当水锤预防措施失效而发生水锤升压时,泄压阀能够迅速地响应水锤压力,泄除多余的高压,从而将管段的水锤破坏降低到最小,当水锤压力降低到设定压力值后,泄压阀具有快开慢关的特性,以较快地消除水锤,同时在关闭过程中不至于产生二次水锤,防止管中突压毁坏管线和设备。考虑到本工程的供水安全性要求较高,为防止水锤预防措施失效,在调流调压阀前设置 2 座超压泄压阀井,超压泄压阀口径为 DN600,采用压力波动阻止阀。

3 水锤防护分析

本工程引水管道沿线地势起伏,输水管道具有多峰的水力特点,采用重力有压管道输水方案,最大静水压 60 m。当管道末端闸、阀发生非正常关闭时或者关闭方案不合理时,可能产生升压很大的水锤,即末端关阀水锤,由关阀水锤而引起的管道内某些位置的壓力低于水的汽化压力时,水流连续性遭到破坏,在此处产生压力极高的水锤,即断流弥合水

锤^[2-3]。结合工程特点及水锤产生的原理,本工程的水锤风险主要为关阀水锤和断流弥合水锤。利用模拟软件对管道的关阀水锤和断流弥合水锤进行分析。在设计流量下管道运行稳态分析见图 2。

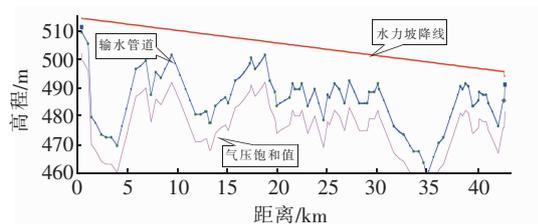


图 2 管道运行稳态分析

Fig. 2 Steady state analysis of pipeline operation

通过软件模拟分析,阀门大概在 75% 开度满足设计流量 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 需求。根据分析结果,在输水管道不采用任何防水锤保护措施的情况下,管道运行时水锤最大压力位于距取水点 34.5 km 处,管道水锤压力约 1.1 MPa,此处管道正常运行压力仅为 0.5 MPa,水锤升压过大且末端阀前压力呈直线型上升,引起的安全风险较大,故应进行必要的水锤防护设计。图 3 为输水管道无保护工况下,末端阀前压力波动曲线。

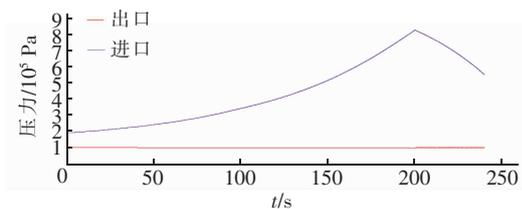


图 3 末端阀前压力波动曲线

Fig. 3 Pressure fluctuation process curve in front of end valve

图 4 为有保护措施管道损坏时,末端阀门关闭时间为 450 s 时进行模拟的压力包络线图。

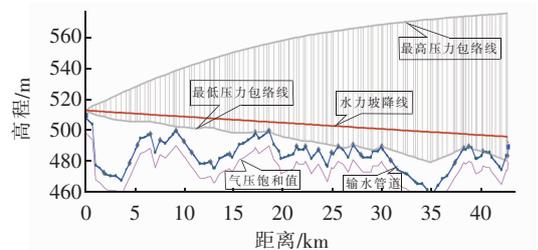


图 4 末端阀门关闭时间为 450 s 时管道压力包络线

Fig. 4 Pipeline pressure envelope at end valve closure time of 450 s

由图 4 可以看出,在管道损坏、末端阀门关闭时

间为 450 s 时,最高压力包络线和最低压力包络线均不理想,关阀水锤最大正压达到 1.1 MPa,水锤压力较大,具有较强的破坏性,且管道局部会产生负压。

图 5 为有保护措施管道损坏,阀门关闭时间为 675 s 时进行模拟的压力包络线图。

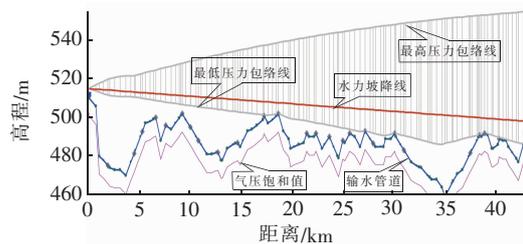


图 5 末端阀门关闭时间为 675 s 时管道压力包络线

Fig. 5 Pipeline pressure envelope at end valve closure time of 675 s

由图 5 可以看出,在管道损坏,末端阀门关闭时间为 675 s 时,关阀水锤最大正压达到 0.9 MPa,仍具有较强的破坏性,局部管道仍存在负压现象,需进一步延长关阀时间。

图 6 为有保护措施管道损坏,阀门关闭时间为 1 350 s 时进行模拟的压力包络线图。

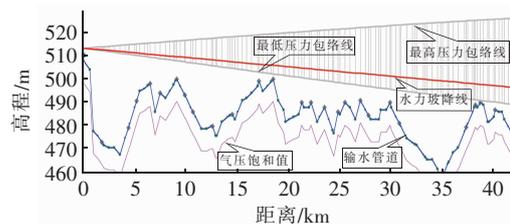


图 6 末端阀门关闭时间为 1 350 s 时管道压力包络线

Fig. 6 Pipeline pressure envelope at end valve closure time of 1 350 s

由图 6 可以看出,在管道损坏,末端阀门关闭时间为 1 350 s 时,关阀水锤最大正压为 0.66 MPa,且管道无负压存在,有利于系统的安全运行。

通过上述不同关阀时间分析,可以看出末端阀门关闭时间为 1 350 s 时,输水管道的水锤升压最小,且无负压产生,建议后期运行时将末端阀门的关闭时间设置在 1 350 s 以上。为进一步确保管线的安全运行,减缓水锤升压,在末端调节阀前,同时设置 2 台 DN600 的安全泄放阀,作为水锤的后保护装置。

综上,本工程的水锤防护方案为:

① 在输水管道沿线高点及特殊节点设置防水锤空气阀或者复合排气阀,以削减弥合水锤;

② 延长末端阀门的关闭时间,将关阀时间设置为大于1 350 s,以降低关阀水锤影响;

③ 在末端调流阀前设置2台DN600的压力波动预止阀,在压力大于设定值时,对管道进行泄压。

4 工程运行效果

该工程已于2021年5月建成通水,目前试运行情况良好,管道输水能力、流速、压力等均满足设计要求,确保了西安市西南郊区域原水输水的安全,为西安市第十四届全运会期间供水提供了有力的保障。

5 结语

随着经济的快速发展,跨区域调水工程越来越多,如何安全可靠地长距离输水,已成为设计人员的重要研究方向。该引水工程设计经验如下:

① 本工程充分利用水源与水厂地形高差,经输水线路、管径比选,最终使长距离重力输水得以实现,既保障了管道的输水安全,又节省了工程建设投资和运行成本。

② 工程设计应确保供水的安全性,本工程通过对输水管道进行模拟分析,采取了沿线设置排气阀、延长末端阀门关闭时间、末端设置泄压阀等安全措施,较好地解决了长距离输水工程中的水锤问题。

本工程建成后将促进西安市西南郊区域经济的进一步发展,具有良好的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 崔红军,吴东升,胡涛,等. 西安某净水厂大口径输水管道工程设计[J]. 中国给水排水,2016,32(12):68-73.
CUI Hongjun, WU Dongsheng, HU Tao, *et al.* Design of large diameter water supply pipeline project for a water treatment plant in Xi'an City [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(12): 68-73 (in Chinese).
- [2] 杨志峰. 杭州萧山长距离大口径输水管道设计总结[J]. 给水排水,2012,38(4):113-116.
YANG Zhifeng. Design summary of the long distance and large diameter water transmission pipe line in Xiaoshan district of Hangzhou City [J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(4): 113-116 (in Chinese).
- [3] 温汝青,崔婧,何士忠,等. 长治市辛安引水工程长距离输水管道设计[J]. 中国给水排水,2015,31(12):44-47.
WEN Ruqing, CUI Jing, HE Shizhong, *et al.* Design of long-distance raw water delivery pipeline for Xin'an water diversion project in Changzhi City [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(12): 44-47 (in Chinese).

作者简介:王俊(1984-),男,河南南阳人,硕士,高级工程师,注册设备工程师(给排水),所长,长期从事市政给排水设计、海绵城市设计及水处理研究工作。

E-mail:286443091@qq.com

收稿日期:2020-07-15

修回日期:2021-07-20

(编辑:孔红春)

开展河湖“清四乱”,打好河湖管理攻坚战