

长距离、高扬程输水管道水锤防护措施

秦 健

晋城市水利勘测设计院 山西 晋城 048000

摘 要：随着城市化进程的加快和区域经济发展的需求，长距离、高扬程输水管道工程日益增多。然而，这类输水管道在运行过程中常面临水锤问题，水锤现象不仅会对管道和设备造成破坏，严重时甚至可能引发爆管事故，危及供水安全。因此，研究长距离、高扬程输水管道的水锤防护措施具有重要的理论和实践意义。本文旨在分析水锤产生的原因和机制，探讨有效的水锤防护措施，为工程实践提供参考。

关键词：长距离输水管道；高扬程；水锤现象；防护措施

引言

水锤，也称水击，是流体在压力管道中因流速急剧变化而产生的一种非恒定流动现象。当阀门突然关闭或开启、水泵启停时，管道内水流速度迅速变化，导致液体内部压强急剧交替升降，这种交替升降的压强作用在管壁、阀门或其他管件上，就像锤击一样，因此称为水锤。在长距离、高扬程输水管道中，由于地形复杂、管道起伏大、流速快，水锤现象尤为严重。

1 长距离、高扬程输水管道水锤产生的原因和机制

1.1 水锤的基本概念

水锤，这一术语在流体动力学中占据着重要地位，它描述的是流体在压力管道内部因流速发生急剧变化而引发的一种非恒定流动现象。具体而言，当流体（如水）在管道中流动时，若其流速突然改变，会导致管道内液体的压强随之迅速且交替地上升和下降。这种压强的急剧变化，不仅波动幅度大，而且变化速度快，对管壁、阀门、接头以及其他管件构成了巨大的瞬时冲击力。这种冲击力，就像锤子敲击一样，因此得名“水锤”。水锤现象在工业生产、城市供水、农田水利等多个领域都可能出现，严重时会造成管道破裂、设备损坏，甚至影响系统的正常运行和安全。

1.2 水锤的产生原因

1.2.1 阀门启闭

阀门作为控制流体流动的关键部件，其启闭状态的变化对水锤的产生有着直接影响。当阀门突然关闭时，原本在管道中快速流动的流体瞬间被阻挡，流速迅速降为零。根据动量守恒原理，流体动量的突然变化会转化为对阀门和管壁的巨大冲击力，同时伴随压强的急剧上升，形成正水锤^[1]。相反，若阀门迅速开启，流体从静止状态突然加速流动，压强则会急剧下降，可能形成负水锤，同样对管道系统构成威胁。

1.2.2 水泵启停

水泵是驱动流体在管道中流动的动力源。在水泵的启动过程中，流体从静止开始加速，流速逐渐增加，这一过程中若控制不当，流速变化过快，同样会引发水锤现象。特别是在水泵突然停止运行时，流体由于惯性继续流动，但失去了水泵的推动力，流速迅速下降，导致压强急剧变化，产生水锤。水泵的启停过程因此成为水锤现象发生的高风险环节。

1.2.3 地形变化

在长距离输水管道中，地形的起伏变化对流体流动状态有着显著影响。当地形存在较大坡度时，流体在重力作用下加速下流，流速增加；而进入上坡段时，流速则可能减慢。这种由于地形变化引起的流速变化，尤其是在坡度突变处，极易引发水锤现象。特别是在高山峻岭地区的输水管道中，地形变化成为水锤产生的一个重要因素。

1.2.4 管道设计不当

管道设计的合理性直接关系到流体流动的稳定性 and 安全性。若管道设计存在缺陷，如管径突然变化、弯头过多或布置不合理等，都会造成流体流动状态的紊乱，增加流速变化的剧烈程度，从而增加水锤现象的发生概率^[2]。例如，管径的突然缩小会导致流体流速急剧增加，压强下降；而管径的突然扩大则会使流速减慢，压强上升。这些设计上的不当之处，都为水锤的产生提供了条件。

2 长距离、高扬程输水管道水锤防护措施研究

2.1 合理设计管道系统

在管道系统的初步设计阶段，就应充分考虑地形变化、水泵启停、阀门启闭等多种因素。地形的起伏会直接影响水流的流速和压力分布，因此，管道走向的设计应尽量顺应地形，避免急剧的坡度变化。同时，管径的选择也需科学合理，既要满足流量需求，又要避免管径

突变引起的流速变化过大。在管道布置上,应尽量减少弯头、变径等局部阻力件的数量,因为这些部件会增加水流的紊乱程度,加剧压力波动^[3]。此外,水泵和阀门的选择也至关重要。水泵的性能应稳定可靠,启停过程应平稳过渡,避免流速的急剧变化。阀门的设计和操作也应考虑水锤的影响,如采用缓闭阀门或设置阀门启闭的控制装置,以减缓流速的变化速率。

2.2 采用缓冲设备

在长距离输水管道中,设置缓冲设备是降低水锤危害的有效手段。空气罐是一种常见的缓冲设备,它可以在管道内形成气垫,当水锤发生时,气垫可以吸收部分压力波动,减轻对管壁的冲击。水锤消除器则是一种更为智能的设备,它在水泵启停时自动开启或关闭阀门,释放或吸收管道内的压力波动,从而有效防止水锤现象的发生。减震器也是一种有效的缓冲设备,它可以通过吸收和消耗水流的动能来减少压力波动。在实际应用中,可以根据管道系统的具体情况和防护需求,选择合适的缓冲设备进行组合使用。

2.3 控制运行参数

在运行过程中,应严格控制管道的运行参数,如流量、压力等。管道应在设计压力范围内运行,避免超压或超流量状态,以减少水锤现象的发生概率。同时,应合理安排水泵的启停时间和顺序,避免多台水泵同时启停引起的水流扰动和压力波动。

2.4 定期检查和维修

定期对长距离输水管道进行检查和维护是确保管道系统安全稳定运行的重要保障。应重点检查管道的连接部位、阀门、水泵等设备,及时发现和处理泄漏、破裂等问题。对于存在隐患的管道和设备,应及时进行维修或更换,确保其性能可靠。同时,还应定期对缓冲设备、阀门等进行定期检查和维修,确保其正常运行和有效防护水锤^[4]。

2.5 利用水锤和瞬态分析软件

随着计算机技术的不断发展,水锤和瞬态分析软件在长距离输水管道的设计和管理中发挥着越来越重要的作用。如OpenFlows HAMMER等软件,可以对管道系统进行瞬态分析和建模,模拟不同工况下的运行状态,预测水锤现象的发生概率和危害程度。通过这些软件的分析结果,可以找出管道系统中的问题点,如管径突变、阀门操作不当等,从而确定相应的水锤控制策略。这为工程实践提供了科学依据,有助于提高管道系统的安全性和可靠性。

3 工程案例分析

3.1 工程概况

工程结合某县城供水实例进行分析,本工程是一项解决某山区县城的一项供水工程,工程的年供水量为861万 m^3 ,分为三级提水,本次选取其中一级提水泵站进行分析,该泵站提水设计流量为 $0.336\text{m}^3/\text{s}$,设计扬程为230.4米,设置有3台水泵机组(2用1备),水泵为多级离心泵,采用2机1管的型式布置,出水管为DN600压力钢管,长度约为6.4公里。

本次工程的事故停泵水锤采用bentley hammer软件进行水利建模,并对事故停泵过程及防护措施进行全过程模拟。本工程的断面示意图,详见图1:

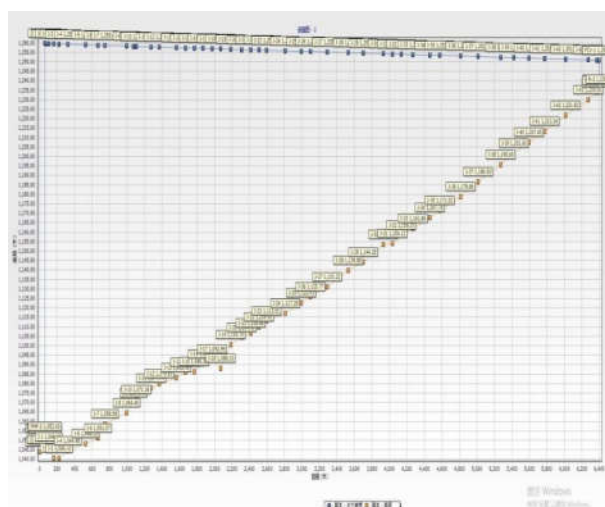


图1 工程纵断面图

从图1中可以看出,本工程具有高扬程、长距离、少起伏的工程特点,一旦发生事故断电停泵,可能对管道的安全运行产生威胁。

3.2 基于模型分析的防护措施方案

3.2.1 无防护措施

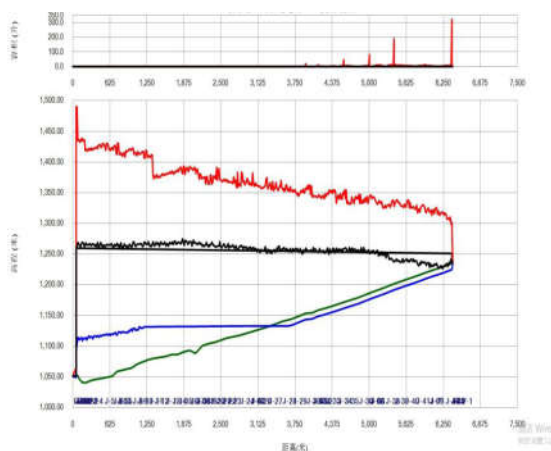


图2 无防护措施压力包络线

利用hammer软件建立模型,图2为无任何防护措施下的管道事故停泵水锤模拟的压力包络线。从图中可以

看出,管道最大正压力发生在水泵出口处,压力可达到4.3mpa,为设计压力2.3mpa的1.9倍,并且管道后半段产生负压,负压最大值可达0.1mpa(10m),综上条件均无法满足水锤的控制要求。

3.2.2空气阀+液控止回阀

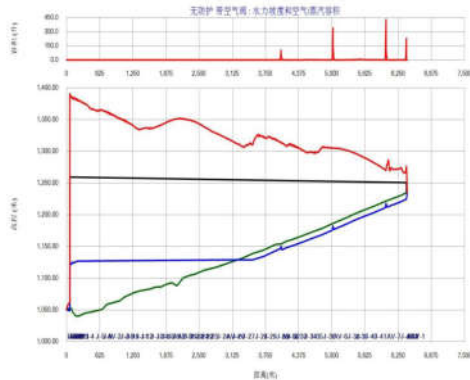


图3 复合式空气阀+液控止回阀压力包络线

图3为复合式空气阀+液控止回阀的防护形式下的管道事故停泵水锤模拟的压力包络线,空气阀布置在管道的凸起点,布置原则为0.8-1km布置一处,总计布置5处复合式空气阀,并设置两阶段关闭的液控止回阀,关闭方式采用4s内关闭90%,40s内关闭至100%的方式,在此设置下进行事故停泵水锤模拟。从图中可以看出,管道最大正压力发生在水泵出口处,压力减小,最大正压可达到3.2mpa,为设计压力2.3mpa的1.4倍,最大正压可满足要求,但管道后半段仍有产生负压,且负压最大值可达0.1mpa(10m),负压条件无法满足需求。

3.2.3空气阀+液控止回阀+10m³水锤消除罐

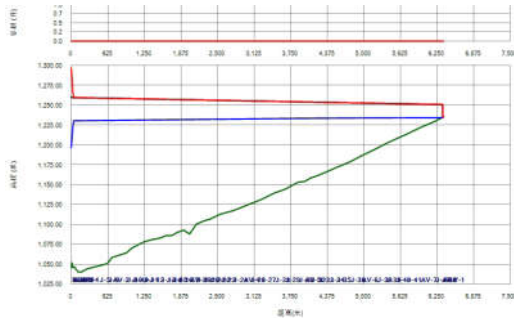


图4 复合式空气阀+液控止回阀+10m³空气罐压力包络

图4为复合式空气阀+液控止回阀+10m³空气罐的防护形式下的管道事故停泵水锤模拟的压力包络线,在上各方案的基础上在泵站的出口总管处设置1台10m³水锤消除罐,从图4中可以看出,管道的气穴现象消失,管道的最大正压力为2.5mpa,接近设计压力,管道后半段负压消失。

3.3方案比选

从图中方案的比较来看,本工程最终选取复合式空气阀+液控止回阀+10m³空气罐的防护形式,可满足输水管道水锤防护的要求,保证管道的安全运行。

3.4案例总结

高扬程、少起伏、长距离输水管道水锤防护工作,在输水管路系统上设置各类水锤防护设备通过hammer软件来进行模拟,根据不同的方案进行比选,在安全可靠的前提下,选取最经济、施工最便捷的方案,为设计提供可靠的理论依据,同时提高输水工程运行的安全性。

结语

长距离、高扬程输水管道的水锤防护措施是一个复杂的系统工程,需要从设计、施工、运行和维护等多个方面入手,采取综合措施。通过合理设计管道系统、采用缓冲设备、控制运行参数、定期检查和利用水锤和瞬态分析软件等措施,可以有效降低水锤对管壁和设备的破坏作用,提高长距离输水管道的运行安全性和经济性。未来,随着科技的不断进步和工程实践的深入积累,长距离、高扬程输水管道的水锤防护措施将不断完善和发展。

参考文献

[1]李健康.长距离输水管道水锤影响不同工况及防护研究[J].水利科学与寒区工程,2025,8(01):21-25.
[2]刘有亮,胡斌超.超高扬程及长距离泵站水锤分析及防护设置[J].中国农村水利水电,2020,(11):112-117.
[3]李连忠,岳楠,李阳,等.长距离高扬程供水工程水锤防护方案对比研究[J].人民珠江,2024,45(S1):120-124.
[4]赵令晖,苏林山.长距离高扬程调水工程停泵水锤防护措施分析及优化[J].给水排水,2022,58(S2):501-506.