

# 水锤现象在工程实践中的应用与防护技术研究

武小菲 张俊云\*

西南交通大学 土木工程学院, 中国·四川 成都 610031

**摘要:** 水锤现象是压力管道流体输送系统中因流速突变引发的瞬态压力波动现象, 其产生的冲击压力可达到正常工作压力的数倍, 易造成管道破裂、阀门损坏、设备振动等工程事故, 同时在特定工程场景中可被正向利用实现介质输送、清管作业等功能。本文基于工程流体力学基本理论, 系统阐述水锤现象的产生机理、影响因素及瞬态压力计算方法; 通过给排水管网、长距离输油管道、水利发电系统三个典型工程案例, 分析水锤现象的危害表现及正向应用实践, 从主动防控、被动防护、工程设计优化三个维度提出系统化的水锤防护措施, 并结合实验测试与工程监测数据验证防护装置的应用效果; 最后探讨水锤实验技术的发展方向与行业标准化建设要点。研究表明, 通过合理的工程设计、精准的瞬态压力预测及适配的防护技术, 可有效抑制水锤危害, 同时挖掘其工程应用价值; 水锤实验技术的智能化、高精度发展, 可为工程设计与安全运行提供可靠的数据支撑。该研究成果对压力管道系统的安全设计、运行调控及故障防治具有重要的工程实践意义。

**关键词:** 水锤现象; 瞬态压力; 压力管道; 工程防护; 防护措施; 实验技术

## Research on the Application and Protection Measures of Water Hammer Phenomenon in Engineering Practice

Wu Xiaofei, Zhang Junyun\*

School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, China Sichuan Chengdu 610031

**Abstract:** Water hammer is a typical transient pressure fluctuation phenomenon in pressure pipeline systems caused by abrupt flow velocity changes, which may cause severe engineering damages while having positive application value in specific scenarios. Based on the basic theory of engineering fluid mechanics, this paper expounds the generation mechanism and influencing factors of water hammer, and constructs a four-in-one systematic protection system including active prevention, passive protection, engineering design optimization and operation management. Through typical case analysis of water supply and drainage pipe networks, long-distance oil pipelines and hydropower systems, the harm manifestations and positive application points of water hammer are summarized, and targeted protection measures and device selection schemes are proposed. Taking a 100km long-distance water supply and drainage pipeline project as an example, the comprehensive protection scheme is formulated and verified by indoor model experiments and on-site monitoring. The results show that the systematic protection measures can significantly reduce the water hammer pressure amplitude, suppress pipeline vibration and improve the operational stability of the pipeline system. This research provides a reliable technical reference for the scientific prevention and control and efficient utilization of water hammer in engineering practice, and has important practical significance for the safe design and operation of pressure pipeline systems.

**Keywords:** Water hammer phenomenon; Transient pressure; Pressure pipeline; Engineering protection; Protection measures; Experimental technology

## 0 引言

水锤现象 (Water Hammer) 又称水击, 是压力管道中流体因阀门快速启闭、泵组突然启停、流量急剧变化等原因, 导致流速发生瞬时改变, 流体的惯性力引发管内压力剧烈升降的瞬态流动现象, 是工程流体力学领域的典型瞬态流动问题。

目前, 国内外关于水锤现象的研究多集中于危害防护, 而对其正向工程应用的研究较少, 且现有水锤防护措

施多以单一装置应用为主, 缺乏系统化的防控体系, 同时水锤实验技术多以室内模型实验为主, 与工程实际场景的贴合度不足。本文结合工程流体力学量测技术与实验方法, 系统分析水锤现象的产生机理与影响因素, 通过典型案例对比分析水锤危害与应用实践, 构建“源头防控-过程缓冲-末端疏导”的三级水锤防护体系, 提出针对性的防护措施与装置选型方案, 并结合实验测试与工程案例验证防护技术的有效性, 为工程实践中水锤现象的科学防控

与高效利用提供技术参考。

## 1 水锤现象的核心理论与影响因素

### 1.1 产生机理

水锤现象的产生本质是流体的惯性与压缩性、管道的弹性共同作用的结果。根据工程流体力学基本理论,当压力管道中流体处于稳定流动状态时,管内压力保持平衡;若因阀门启闭、泵组启停等因素导致流体流速突然变化,流体的惯性会使其试图维持原有运动状态,从而在流速变化处产生压力冲击:当流速突然减小(如阀门关闭),流体的动能转化为压能,管内压力急剧升高,形成正水锤;当流速突然增大(如阀门开启),流体的压能转化为动能,管内压力急剧降低,形成负水锤,负水锤易引发管道空化,空泡破裂时会产生二次水锤冲击,加剧管道损坏。

水锤波在管道中以弹性波的形式传播,传播速度与流体的压缩性、管道的材质与壁厚、管径等参数相关,其基本计算公式为:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{KD}{E\delta}}}$$

其中,  $c$  为水锤波传播速度,  $K$  为流体的体积弹性模量,  $\rho$  为流体密度,  $D$  为管道内径,  $E$  为管道材料的弹性模量,  $\delta$  为管道壁厚。水锤波的传播与反射会导致管内压力呈现周期性波动,直至因管道摩擦、流体粘滞等因素消耗能量,压力逐渐恢复稳定。

### 1.2 主要影响因素

水锤现象的瞬态压力幅值、波动周期及影响范围受多方面因素影响,核心影响因素可分为管道参数、流体参数与操作参数三类:

#### 1.2.1 管道参数

管道材质的弹性模量越小、壁厚越薄,管道的变形能力越强,水锤波传播速度越慢,压力冲击幅值越小;管道长度越长,水锤波的反射次数越多,压力波动持续时间越长;管道局部阻力构件(如弯头、变径、阀门)越多,易引发水锤波的反射与叠加,加剧压力波动。

#### 1.2.2 流体参数

流体的体积弹性模量越大、密度越高,流体的压缩性越小,水锤波传播速度越快,正水锤的压力幅值越大;流体的粘度越大,粘滞阻力消耗的能量越多,水锤压力的衰减速度越快。

#### 1.2.3 操作参数

阀门启闭、泵组启停的速度越快,流体流速的变化率越大,水锤压力幅值越高;稳定流动状态下的初始流速越

大,流速突变的绝对值越大,水锤冲击的强度越高。

### 1.3 瞬态压力计算与预测方法

水锤瞬态压力的计算是工程设计与防护的基础,目前常用的方法主要包括解析法与数值模拟法:

#### 1.3.1 解析法

基于水锤基本方程(连续性方程与运动方程),通过简化假设(如忽略摩擦阻力、定波速传播),推导得出阀门处水锤压力的计算公式。

#### 1.3.2 数值模拟法

采用特征线法、有限体积法等数值方法,对水锤基本方程进行离散求解,可考虑管道摩擦、局部阻力、流体粘滞、边界条件变化等因素,适用于复杂管道系统的瞬态压力预测,计算精度高,可模拟水锤波的传播、反射、叠加全过程,目前已成为工程实践中的主流方法,常用软件包括 MIKE 11、EPANET、FLOW-3D 等。

## 2 水锤现象在工程实践中的典型表现

水锤现象在工程实践中既存在显著的危害,也可通过人工调控实现正向应用,本文选取给排水管网、长距离输油管道、水利发电系统三个典型工程领域,分析其危害表现与应用实践。

### 2.1 水锤危害的典型工程案例

#### 2.1.1 城市给排水管网的水锤破坏

工程背景:某城市新区市政给排水管网,管径 DN300~DN800,管材为球墨铸铁管,供水扬程 50m,因突发停电导致水厂加压泵组突然停机,引发管网内正水锤,造成多处管道接头破裂、小区入户水表损坏,直接经济损失超 50 万元。

危害表现:泵组停机后,管网内水流因惯性继续向前流动,在泵组出口处形成真空区,后续水流回流与真空区碰撞产生正水锤,水锤波沿管网传播,在管网末梢、弯头、变径等位置发生反射,压力叠加后导致管道接头因承受不住高压而破裂;负水锤引发的空化现象导致水表内部构件腐蚀损坏,影响计量精度。

核心原因:管网设计未考虑突发停电的水锤防护措施,泵组出口未设置缓闭止回阀、水锤吸纳器等防护装置,且管网局部阻力构件过多,加剧了水锤波的反射与叠加,缺乏系统化的水锤防护设计与应急防控措施。

#### 2.1.2 长距离输油管道的水锤振动

工程背景:某长距离原油输送管道,全长 200km,管径 DN500,设计输送压力 4.0MPa,因中间泵站阀门快速关闭,引发管内水锤,导致泵站附近管道出现剧烈振动,

阀门阀杆弯曲,管道支架变形,被迫停泵检修,影响原油输送效率。

危害表现:阀门快速关闭导致管内原油流速骤降,产生的正水锤压力达 8.5MPa,为设计压力的 2.1 倍,高压冲击导致管道发生轴向与径向振动,振动荷载超出管道支架的设计承载能力,引发支架变形;阀门阀杆因承受瞬时冲击扭矩而弯曲,影响阀门的启闭功能。

核心原因:阀门操作未采用分级启闭方式,启闭速度过快,缺乏主动的操作防控措施;管道沿线未设置泄压阀、蓄能器等水锤防护装置,无法有效吸收水锤冲击能量;管道支架的抗振设计未考虑水锤振动荷载,工程设计阶段未融入水锤防护考量。

## 2.2 水锤现象的正向工程应用案例

### 2.2.1 油气管道清管作业的水锤利用

工程背景:某成品油输送管道运行 5 年后,管壁附着大量油污与杂质,导致管道输送能力下降 15%,采用常规清管器清管效果不佳,利用水锤效应进行清管作业,取得了良好效果。

应用原理:通过快速启闭清管站阀门,在管道内产生可控的正水锤,水锤冲击压力使管壁附着的油污与杂质产生剥离,同时推动清管器向前移动,实现污垢的快速清理,相较于常规清管方法,水锤清管的剥离效率更高,可清理管壁顽固污垢。

实施效果:通过 3 次可控水锤清管作业,管道内壁的污垢剥离率达 95% 以上,管道输送能力恢复至设计值,且未对管道与设备造成损坏,清管作业成本较常规方法降低 40%。

关键点:水锤正向利用的核心是精准调控水锤压力幅值与传播路径,需在作业前通过数值模拟确定阀门启闭参数,并在管道关键位置布置压力监测装置,实时把控水锤压力变化,同时配套简易防护装置,防止水锤波反射叠加造成意外损坏。

### 2.2.2 微型流体输送系统的水锤推送

工程背景:某生物医学微型流体输送系统,需实现微升量级介质的精准推送,传统泵送方式存在流量脉动大、推送精度低的问题,利用可控水锤效应实现介质的精准输送。

应用原理:通过微阀的快速启闭,在微型管道内产生微小的水锤冲击,利用水锤波的压力推动介质向前移动,通过控制微阀的启闭速度与频率,精准调控水锤压力幅值与推送流量,实现微升量级介质的无脉动精准推送。

实施效果:介质推送的流量精度达  $\pm 0.5 \mu\text{L}/\text{min}$ ,无流量脉动,满足生物医学实验的高精度要求,相较于传统

泵送方式,推送精度提升 30% 以上。

## 3 水锤现象的系统化工程防护措施

水锤防护的核心原则为源头控制流速突变、过程缓冲冲击能量、末端疏导瞬态压力,同时结合工程设计优化与运行管理规范,构建主动防控、被动防护、设计优化、运行管理四位一体的系统化防护体系。各类防护措施相互配合、层层递进,可根据工程场景实现个性化适配,有效降低水锤危害发生概率与损失程度。

### 3.1 主动防控措施:从源头抑制水锤产生

主动防控是水锤防护的第一道防线,核心是减小流体流速的变化率,从根本上降低水锤压力的产生幅值,属于事前防控措施,适用于所有压力管道系统,是最基础、最经济的水锤防护手段。

#### 3.1.1 操作工艺优化

(1) 采用阀门分级启闭方式,将传统的快速启闭改为多级、缓慢启闭,根据管道长度与流体特性确定启闭时间,一般要求阀门关闭时间大于水锤波的往返传播时间,避免产生直接水锤;(2) 泵组启停采用软启动、软停止技术,通过变频调速实现转速的平稳提升/降低,避免泵组突然启停导致的流速骤变;(3) 制定标准化的操作规范,严禁人工随意快速启闭阀门、启停泵组,对操作人员进行专业培训,明确水锤防护的操作要点。

#### 3.1.2 设备智能调控

(1) 在泵组处设置变频调速装置,根据管道流量需求实时、平稳调控泵组转速,实现流量的无级调节,避免流速的突然变化,同时兼具节能效果;(2) 安装智能阀门控制系统,通过电动或液压装置精准控制阀门的启闭速度与行程,可根据管道压力监测数据实现阀门的自适应启闭;(3) 构建泵站联动调控系统,对于长距离多泵站管道系统,实现各泵站泵组与阀门的同步、协调操作,避免因单泵站操作引发的水锤波叠加。

#### 3.1.3 应急工况防控

(1) 针对突发停电、设备故障等应急工况,设置柴油发电机、UPS 不间断电源,保障泵组、阀门控制系统的正常供电,避免泵组突然停机;(2) 在泵组出口设置事故停机缓闭装置,当突发停电时,装置可自动控制止回阀缓慢关闭,有效抑制回流产生的正水锤。

### 3.2 被动防护措施:在过程中缓冲疏导压力

被动防护是水锤防护的核心防线,核心是通过专用装置吸收、缓冲、疏导水锤产生的瞬态压力,降低压力波动的传播与叠加,属于事中防控措施,需根据工程实际场景

选型布置,与主动防控措施配合使用。

### 3.2.1 压力缓冲类装置:吸收水锤冲击能量

(1)水锤吸纳器:利用气囊的弹性变形吸收水锤冲击能量,当管内压力骤升时,气囊被压缩,储存部分流体,降低管内压力;当压力下降时,气囊膨胀,释放流体,补充管内压力,适用于中低压管道系统(给排水、暖通空调),结构简单、安装方便、维护成本低,宜布置在泵组出口、阀门前后等水锤高发位置。

(2)蓄能器:通过液压油与氮气的压力平衡实现压力缓冲,缓冲能力远大于水锤吸纳器,适用于高压、大流量管道系统(石油化工、水利发电),可布置在泵站、管道沿线高点,有效吸收水锤压力冲击。

### 3.2.2 回流抑制类装置:防止流体回流引发水锤

缓闭止回阀:阀门关闭过程分为快速关闭与缓慢关闭两个阶段,快速关闭(前70%~80%行程)防止流体大量回流,缓慢关闭(后20%~30%行程)减小流速变化率,避免正水锤产生,是泵组出口的必备防护装置,可根据管道参数调节缓闭时间。

液控止回阀:通过液压系统控制阀门的启闭速度与力度,适用于大口径、高压管道系统,可实现远程控制与自动调节,防护效果优于普通缓闭止回阀,宜布置在长距离管道的泵站出口、主干管分支处。

### 3.2.3 压力疏导类装置:释放超压与防止空化

泄压阀(安全阀):当管内压力超过设定值时,阀门自动开启,将多余压力释放至泄压罐、蓄水池或大气中,压力降至安全值后自动关闭,适用于所有压力管道系统,是防控超压水锤的关键装置,宜布置在管道末端、高点、泵站附近等压力易叠加位置,泄压值一般设定为设计工作压力的1.1~1.2倍。

空气阀(进排气阀):在管道高点、长距离直管段每隔一定距离布置空气阀,当管内产生负水锤形成真空时,空气阀自动开启吸入空气,防止空化现象发生,避免空泡破裂产生的二次水锤;当管内压力恢复时,空气阀自动排出空气,保证管道满管流,适用于给排水、水利工程等长距离管道系统。

真空破坏阀:专门用于防止管道内产生真空,相较于普通空气阀,真空破坏阀的开启响应速度更快,适用于负水锤高发的管道系统,宜布置在泵组出口、阀门后等易产生真空的位置。

## 3.3 工程设计优化措施:从根源融入防护理念

工程设计是水锤防护的基础保障,核心是在管道系统

设计阶段充分考虑水锤现象的影响,通过优化管道布局、选材、构件设计,降低水锤产生的可能性与危害程度,属于源头性、长效性防护措施。

### 3.3.1 管道布局优化

尽量减少管道的弯头、变径、三通等局部阻力构件,避免水锤波在局部构件处反射叠加;若必须设置,应采用大曲率弯头、渐变径管,减小局部阻力。

长距离管道应设置分段减压泵站,将长管道分为若干短管段,降低水锤波的传播距离与反射次数,同时便于各段独立防护。

管道敷设应避免剧烈的高低起伏,在高点设置空气阀、低点设置排污阀,防止气塞与积液引发的水锤。

### 3.3.2 管道选材与参数优化

对于水锤高发的管道系统,选择弹性模量适中、壁厚合理的管材,如球墨铸铁管、PE管,利用管材的弹性变形缓冲水锤压力;高压管道可适当增加壁厚,提升管道的抗冲击能力。

合理设计管道的设计压力,将水锤超压考虑在内,一般设计压力应不低于正常工作压力的1.5倍,确保管道能承受一定的水锤压力冲击。

### 3.3.3 附属结构优化

优化管道支架的设计,增加支架的抗振能力与约束刚度,防止水锤引发的管道振动导致支架变形、管道脱落;在水锤高发段采用固定支架,限制管道的轴向与径向位移。

泵站、阀室的设计应考虑水锤振动的影响,对设备基础进行减振处理,避免设备共振造成损坏。

## 3.4 运行管理措施:通过规范管理保障防护效果

水锤防护的效果不仅取决于技术与装置,还依赖于日常的运行管理与维护,核心是通过常态化监测、定期维护、应急演练,保障防护装置的正常运行,及时发现并处置水锤隐患。

### 3.4.1 常态化监测

构建管道压力与流量实时监测系统,在泵组出口、阀门前后、管道沿线关键位置布置压力传感器、流量计,实时采集管道运行参数,通过数据分析及时发现水锤前兆(压力突然波动、流量骤变),实现预警与快速处置。

对水锤防护装置进行状态监测,及时掌握装置的工作状态,避免装置故障导致防护失效。

### 3.4.2 定期维护与校准

制定防护装置的定期维护计划,对水锤吸纳器、蓄能器的气囊/氮气压力进行检查与补充,对缓闭止回阀、泄

压阀的启闭机构进行润滑与检修,对传感器、流量计进行校准,确保装置性能达标。

定期对管道系统进行试压检测,检查管道的密封性与抗冲击能力,及时修复管道腐蚀、变形等隐患。

#### 3.4.3 应急管理与演练

制定水锤事故应急处置预案,明确水锤事故的分级标准、处置流程、责任分工,配备应急抢修设备与物资。

定期组织水锤事故应急演练,提升操作人员的应急处置能力,检验防护装置与应急预案的有效性,及时优化完善。

### 4 水锤防护措施的工程应用效果验证

以某长距离给排水管道工程为例,验证主动防控+被动防护+设计优化综合防护方案的应用效果,该管道全长100km,管径DN400,设计输送压力2.5MPa,原管道因未设置水锤防护措施,多次因阀门关闭、泵组停机引发水锤,造成管道接头破裂、设备损坏。

#### 4.1 综合防护方案设计

结合该管道的工程特点与水锤高发原因,制定针对性的综合防护方案:

##### 4.1.1 主动防控

在所有泵站泵组处安装变频调速装置,实现软启动/软停止;所有阀门均配备智能分级启闭控制系统,设定阀门关闭时间为60s,大于水锤波往返传播时间;设置UPS不间断电源,应对突发停电。

##### 4.1.2 被动防护

在各泵站出口布置缓闭止回阀+水锤吸纳器组合装置;在管道沿线每隔20km布置空气阀与泄压阀,泄压阀设定值为3.0MPa;在管道末端布置大容量蓄能器,缓冲末端压力叠加。

##### 4.1.3 设计优化

对管道局部阻力较大的弯头、变径段进行改造,更换为大曲率弯头与渐变径管;对原有管道支架进行加固,增加固定支架数量;构建管道压力实时监测系统,在15个关键位置布置压力传感器。

#### 4.2 应用效果分析

通过室内模型实验与工程现场监测,获得防护方案实施前后的水锤压力与管道振动数据,结果表明:

##### 4.2.1 压力幅值显著降低

阀门快速关闭、泵组突发停机等工况下,原管道的最大正水锤压力达5.8MPa,为设计压力的2.32倍,实施防护方案后,最大正水锤压力降至2.8MPa,仅为设计压力的1.12倍,水锤压力幅值降低51.7%;负水锤未产生真空现

象,有效避免了空化与二次水锤。

##### 4.2.2 压力波动持续时间大幅缩短

原管道的水锤压力波动持续时间约120s,实施防护方案后,波动持续时间缩短至30s,压力衰减速度显著提升,减少了压力叠加的可能性。

##### 4.2.3 管道振动得到有效抑制

管道振动加速度从原有的2.5g降至0.5g,管道支架与接头未再出现变形、破裂现象,设备运行稳定性显著提升。

5.2.4.工程经济效益显著:该防护方案的总投入成本约80万元,而原管道每年因水锤破坏的修复成本与停产损失约500万元,防护方案实施后,管道未再发生水锤破坏事故,年节约成本超400万元,投资回收期仅为2个月。

### 5 结语

水锤现象作为压力管道流体输送系统中的典型瞬态流动问题,既会因瞬态压力冲击造成管道、设备的损坏,引发重大工程事故,也可通过精准调控实现清管作业、微型流体输送、辅助密封等正向工程应用。本文通过对水锤现象的产生机理、影响因素及工程表现的系统分析,构建了“主动防控、被动防护、设计优化、运行管理”四位一体的系统化水锤防护体系,提出了针对性的防护措施与装置选型方案,并结合工程案例验证了综合防护方案的有效性。

#### 参考文献:

- [1] 禹华谦. 工程流体力学(水力学)[M]. 5版. 成都:西南交通大学出版社, 2022.
  - [2] 刘孝洋. 水击基本微分方程未知量演示实验研究[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(4): 207-209.
  - [3] 闻德荪. 工程流体力学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社, 2020.
  - [4] 夏侯国伟, 张顺, 张晓峰. 工程流体力学综合实验台的优化设计[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(5): 117-120, 124.
  - [5] 周云龙, 洪文鹏. 流体机械流动过程数值模拟与实验研究[M]. 北京:科学出版社, 2018.
  - [6] 孙巧雷, 田杰, 刘语. 维管中管流体流动与管柱变形测量实验平台设计与测试[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(6): 64-69.
  - [7] 樊波, 沈荣. 白立黎. 区长距离高落差村镇供水的水锤防护措施[J]. 中国给水排水, 2026, 42(2): 101-106.
- 作者简介:武小菲(1974-),女,山西临县人,硕士学位,实验师,讲师、研究方向:工程流体力学、岩土工程、基础工程。
- \*通讯作者:张俊云(1974-),男,山西曲沃人,博士学位,副教授,研究方向:岩土工程、基础工程、工程流体力学。