

水利液压系统空化现象的产生机理及抑制方法研究

徐航

南水北调中线信息科技有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i8.4958

[摘要] 空化现象本质是液体在局部低压区汽化形成气泡,于高压区溃灭。该过程虽基于流体力学原理,却严重威胁水利设施安全稳定高效运行。本文旨在系统性地探究水利液压系统中空化现象的产生机理、发展演化规律及其多维度危害,并在此基础上,全面梳理和评述当前主流的空化抑制方法。研究首先从热力学与流体力学角度,深入剖析了空化的成核、生长与溃灭全过程;其次,详细阐述了空化对水工结构造成的侵蚀破坏、诱发的振动与噪声、以及对系统水力性能产生的负面影响;最后,从优化水力设计、改进材料与表面处理、引入主动控制技术以及智能监测预警四个层面,构建了一个多层次、系统化的空化抑制策略体系。研究表明,单一的抑制手段难以应对复杂多变的工程实际,未来的研究方向应聚焦于多物理场耦合仿真、新型抗空蚀材料开发以及基于人工智能的空化智能感知与主动调控技术,为保障国家重大水利工程的安全长效运行提供坚实的理论与技术支持。

[关键词] 水利液压系统; 空化现象; 产生机理; 空蚀破坏; 抑制方法

中图分类号: TV734 **文献标识码:** A

Research on Generation Mechanism and Suppression Methods of Cavitation Phenomenon in Hydraulic Systems of Water Conservancy

Hang Xu

South-to-North Water Diversion Middle Route Information Technology Co., Ltd.

[Abstract] The essence of cavitation phenomenon is the vaporization of liquid in local low-pressure areas to form bubbles, which then collapse in high-pressure areas. Although this process is based on fluid mechanics principles, it seriously threatens the safe, stable, and efficient operation of water conservancy facilities. This paper aims to systematically explore the generation mechanism, evolution law, and multi-dimensional hazards of cavitation phenomenon in hydraulic systems of water conservancy, and on this basis, comprehensively review and evaluate current mainstream cavitation suppression methods. The research first deeply analyzes the entire process of cavitation nucleation, growth, and collapse from thermodynamic and fluid mechanics perspectives. Secondly, it elaborates on the erosion damage caused by cavitation to hydraulic structures, induced vibration and noise, and negative impacts on system hydraulic performance. Finally, a multi-level, systematic cavitation suppression strategy system is constructed from four aspects: optimizing hydraulic design, improving materials and surface treatment, introducing active control technology, and intelligent monitoring and early warning. Research shows that a single suppression method is difficult to cope with complex and variable engineering practices. Future research directions should focus on multi-physics field coupling simulation, development of new anti-cavitation materials, and AI-based intelligent cavitation perception and active regulation technology, providing solid theoretical and technical support for ensuring the safe and long-term operation of major national water conservancy projects.

[Key words] hydraulic system of water conservancy; cavitation phenomenon; generation mechanism; cavitation damage; suppression method

引言

水利液压系统是水资源调控等核心载体,其内部水流状态

关乎工程效能与寿命。在水轮机等关键部位,因几何形状突变或流速剧增会形成局部低压区,压力降至对应温度下液体饱和蒸

汽压时,液体汽化形成“空化”,产生大量微小气泡。气泡进入下游高压区后,在极短时间内溃灭,释放巨大能量,产生冲击波和微射流。这种反复高频能量冲击会引发“空蚀”,威胁水工建筑物结构完整性。自20世纪初,空化问题就备受工程界关注,诸多案例证明其危害严重。如今,“十四五”规划对水利建设提出更高要求,深入理解空化机制、发展抑制防护技术成为关键科学问题。本文将围绕水利液压系统空化现象展开论述,解析其产生发展机理,评估危害,探讨并展望抑制方法,为科研与工程实践提供参考。

1 空化现象的产生机理

空化并非简单的气泡生成,而是一个涉及热力学相变、流体动力学不稳定性及多相流相互作用的复杂物理过程。其完整生命周期可划分为成核(Nucleation)、生长(Growth)与溃灭(Collapse)三个阶段。

1.1 成核阶段: 气泡的初始形成

液体在理论上可以承受相当大的负压(张力),但在实际工程环境中,由于存在各种“杂质”,液体的抗拉强度远低于理论值。这些“杂质”主要包括水中不可避免地溶解的空气或其他气体,以及水工结构表面的微小凹坑、裂纹或疏水区域。在低压扰动下,溶解的气体会在微小颗粒(如尘埃、盐分结晶)表面析出,形成稳定的微气泡核心;同时,固体表面的缺陷也能够捕获气体,成为气泡优先形成的位点^[1]。根据经典成核理论,气泡的形成需要克服一个能量势垒。临界气泡半径 r_c 可由开尔文方程描述:

$$r_c = \frac{2\sigma}{p_v - p}$$

其中, σ 为液体表面张力, p_v 为饱和蒸汽压, p 为环境压力。只有当形成的气泡半径大于 r_c 时,它才能在低压环境下稳定存在并继续生长。在水利系统中,流道几何突变(如叶片背面、闸墩后方)导致的局部加速降压,是触发成核的主要诱因。

1.2 生长阶段: 气泡的动力学演化

一旦稳定的气核形成,其后续行为主要受周围流场压力梯度的支配。在低压区,气泡内部的蒸汽压和气体分压之和高于外部流体静压,气泡会通过液体向其内部快速蒸发以及周围溶解气体向内扩散两种方式迅速膨胀。初期的生长主要由蒸发主导,而后期则更多地依赖于气体的扩散。值得注意的是,气泡的生长并非孤立事件,大量气泡的聚集会形成空化云或空化带,从而显著改变局部流场的密度、粘度和声速,形成复杂的气液两相流。这种两相流反过来又会影响主流的压力分布,可能加剧或抑制空化的进一步发展,形成强烈的流固耦合效应,使得整个流场呈现出高度的非定常性和不稳定性。

1.3 溃灭阶段: 能量的瞬时释放

当携带气泡的流体进入下游高压区时,气泡内外压力失衡,开始剧烈收缩。理想情况下,球形气泡的溃灭是对称的,但现实中几乎不存在完美的对称条件。邻近固体壁面、速度梯度或其它气泡的存在,都会导致溃灭过程的非对称性。这种非对称溃灭

会产生两个极具破坏性的物理效应:一是在溃灭末期,气泡靠近壁面的一侧会形成一个高速(可达100-400m/s)的液体射流,垂直冲击壁面;二是气泡完全溃灭的瞬间,其内部残留的少量不可凝气体被绝热压缩,产生高强度的压力脉冲波。微射流和冲击波的联合作用,在壁面上形成极高的局部应力(可达1-5GPa),远超绝大多数工程材料的屈服强度。每一次溃灭都相当于一次微型爆炸,虽然单次能量微小,但高频(kHz量级)的重复冲击足以造成材料的累积损伤,最终导致宏观的结构破坏。

2 空化现象的危害分析

空化对水利液压系统的危害是全方位的,主要体现在结构安全、运行稳定性和水力效率三个方面。

2.1 空蚀破坏: 对水工结构的直接威胁

空蚀是空化最直观、最具破坏性的后果。其破坏过程具有典型的“麻点—蜂窝—沟槽”演化特征。初期表现为材料表面出现密集的微小麻点;随着侵蚀加深,麻点连片形成蜂窝状孔洞;最终,材料大面积剥落,形成深度沟槽,彻底改变过流部件的几何形状。例如,在混流式水轮机中,转轮叶片的上冠和环下连接处、叶片背面出口边是空蚀高发区。严重的空蚀不仅削弱了叶片的结构强度,可能导致断裂事故,还大幅增加了维修成本和停机时间,对电站的经济运行构成直接挑战。

2.2 诱发振动与噪声: 影响系统稳定性

空化云的周期性形成与溃灭,会引起流场压力的剧烈、随机波动。这种压力脉动会通过流体介质传递到整个水力机械和管道系统,激发结构的固有频率,引发强烈的机械振动。持续的振动会加速轴承、密封等部件的疲劳失效,降低设备寿命,并可能干扰精密测量仪器的正常工作^[2]。同时,空化溃灭产生的宽频噪声(通常在1-100kHz范围内)不仅构成环境污染,影响工作人员的身心健康,其声学信号本身也是监测空化状态的重要依据,但过强的噪声也可能掩盖其他故障信号,给设备的状态诊断带来困难。

2.3 水力性能恶化: 降低系统效率

空化改变了流道内的有效过流面积和流态。大量的气泡使得流体的有效密度降低,破坏了原有的速度环量分布,导致水力损失增加。对于水轮机和水泵而言,这直接表现为扬程(或水头)下降、流量减小、效率降低,甚至可能出现“断裂工况”,即性能曲线发生陡降,系统无法正常工作。此外,空化还会引起轴向推力的剧烈波动,对推力轴承构成额外负担,可能导致轴承过热或损坏,进一步威胁机组的安全稳定运行。这种性能的恶化不仅降低了能源转换效率,也限制了设备在最优工况区的运行范围。

3 空化抑制方法研究

鉴于空化危害的严重性,国内外学者和工程师们发展了多种抑制策略,可归纳为以下四个层面。

3.1 优化水力设计: 从源头上预防空化

这是最根本、最经济的抑制方法,其核心思想是通过精心的流道几何形状设计,从根本上避免或极大地减弱局部低压区的形成。针对水轮机转轮、水泵叶轮等旋转机械,现代工程广

泛采用先进的计算流体力学(CFD)软件进行三维反问题设计,通过优化叶片的进出口安放角、厚度分布和头部形状(如采用超空泡翼型或钝头设计),以实现流线的平顺过渡,有效延缓边界层分离,从而提高叶片表面的最低压力,使其远离饱和蒸汽压。在固定部件的设计上,如蜗壳、尾水管乃至高速泄洪洞,同样强调采用光滑过渡的曲面,极力避免尖锐拐角和突然的断面扩大或收缩。一个经典的工程实践是在高速水流出出口处设置掺气减蚀设施,巧妙地利用掺入的空气在壁面附近形成一层缓冲垫,用以吸收和分散空化溃灭时产生的巨大冲击能量^[9]。此外,从系统层面考虑,通过抬高进水池水位或优化吸入管路布局以减小流动阻力损失,从而提高装置的有效空化余量(NPSHa),确保系统入口有足够的压力裕度,也是预防空化的关键措施。

3.2改进材料与表面处理:增强抗空蚀能力

当水力设计优化已达到极限,无法完全规避空化风险时,提升过流部件自身的抗空蚀性能便成为至关重要的第二道防线。工程实践中,普遍选用不锈钢(如0Cr13Ni4Mo、0Cr16Ni5Mo)或高铬铸铁等兼具高硬度与良好韧性的合金材料来制造易损件,以抵抗微射流和冲击波的反复打击。在此基础上,各种先进的表面强化技术被广泛应用。例如,在成本相对较低的碳钢基体上堆焊一层不锈钢或司太立合金,既能有效防护又能控制成本;利用激光熔覆或表面淬火等高能束技术,可以在材料表层形成细晶、高硬的强化区域,显著提升局部耐磨抗蚀性;而通过超音速火焰喷涂(HVOF)或等离子喷涂制备的WC-Co、Al₂O₃-TiO₂等陶瓷-金属复合涂层,则以其极高的硬度和化学稳定性,为关键部件提供了卓越的保护。近年来,表面织构技术也展现出巨大潜力,通过对表面进行微观尺度的激光刻蚀或喷丸处理,形成特定的凹坑或沟槽阵列,这些微结构能够有效捕获溃灭产生的微射流,改变其冲击方向,或将润滑介质滞留在表面,起到缓冲和润滑的双重作用,从而巧妙地化解冲击能量。

3.3主动控制技术:动态干预空化过程

这是一种更为前沿和智能化的方法,旨在通过外部能量的实时输入,对正在发生的空化过程进行动态干预和调控。其中,声学激励是一种颇具前景的技术,通过向流场中施加特定频率和振幅的声波,可以有效地干扰空化云的聚团过程和溃灭的同步性,使其溃灭行为变得弥散而非集中,从而显著降低作用于壁面的局部冲击强度。对于导电流体环境,电磁场控制技术则利用磁场对流体运动特性的调制作用,间接影响空化泡的动力学行为^[4]。另一个创新思路是微气泡注入法,即在空化可能发生区域的上游,主动、精确地注入大量尺寸均匀的微小惰性气体气泡。这些“人工气核”在流场中扮演着“牺牲气泡”的角色,它们优

先溃灭并吸收了大部分冲击能量,从而有效地保护了下游的固体壁面。尽管这些主动控制技术大多仍处于实验室研究或小规模模验证阶段,但其展现出的巨大潜力预示着未来空化抑制技术的发展方向。

3.4智能监测与预警:实现状态感知与预测维护

随着物联网、大数据和人工智能技术的飞速发展,对空化进行实时、在线的智能监测与预警已成为现实,并正深刻改变着传统的运维模式。现代监测系统不再依赖单一传感器,而是通过综合运用振动、声发射、压力脉动传感器乃至高速摄像机等多种手段,实现对空化多维特征信号的同步采集。在此基础上,借助小波变换、经验模态分解(EMD)等先进的信号处理技术,可以从复杂的背景噪声中精准提取出空化的特征指纹。随后,利用支持向量机(SVM)、卷积神经网络(CNN)等机器学习算法,可以构建高精度的空化状态智能识别模型,准确判别系统处于无空化、初生空化、临界空化还是严重空化状态。更进一步,通过构建水利设施的数字孪生平台,将实时监测数据与高保真的CFD仿真模型进行深度融合,不仅可以实现对当前空化状况的精确诊断,还能对其未来的发展趋势进行科学预测,从而为制定最优的预测性维护策略提供强大的决策支持,真正实现从“被动抢修”到“主动预防”的转变。

4 结语

水利液压系统中的空化现象是复杂交叉学科问题,本文系统阐述了其物理机理,深入分析了危害,并梳理了从被动防御、主动干预到智能感知的多层次抑制策略体系。研究表明,未来空化研究将呈现三大趋势:一是精细化与多物理场耦合仿真成主流,发展高精度数值模型,为机理研究和抑制方案设计提供虚拟试验平台;二是智能材料与自适应结构研究将突破,探索自感知、自修复功能的材料,实现“以柔克刚”的防护理念;三是AI驱动的闭环控制系统将逐步走向工程应用,通过智能监测与主动控制技术融合,构建一体化闭环系统,使系统能根据实时空化状态自动调节,实现动态、精准调控。

[参考文献]

- [1]汪刚,王桂虹,骆彦辰,等.水轮机空化现象智能识别的分类模型训练方法[J].水力发电,2023,49(7):67-72,77.
- [2]韩文福,桂中华,满哲,等.模型水轮机空化现象智能识别方法[J].水利水电科技进展,2024,44(6):13-19.
- [3]刘子晨,马云飞,刘乐璠,等.液压锥阀阀芯振荡空化现象数值模拟[J].液压气动与密封,2022,42(7):24-29.
- [4]朱葛,董世民.基于空化模型的泵阀运动特性及水击现象[J].中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(6):124-132.