

能够提升结构整体抗震承载力。数据表明,采用加强构造后,极限承载力提高约18%,抗剪承载力峰值增幅超过12%,为大型泵站厂房在强震环境下提供了更稳固的抵抗能力。

## 5.2 新型减隔震技术在泵站厂房中的应用

减隔震技术通过调整结构与地基之间的能量传递路径,降低地震动对主体结构的直接冲击。橡胶隔震支座、铅芯隔震器以及黏滞阻尼器的应用能够显著改善厂房在强震下的动力反应。试验模拟显示,采用隔震支座后,结构顶点最大位移由92mm下降至54mm,降低幅度达41%。当加入黏滞阻尼装置时,结构加速度响应峰值由 $1.2\text{m/s}^2$ 下降至 $0.7\text{m/s}^2$ ,减幅达到42%。这种能量耗散机制能够有效延长结构的振动周期,减缓地震能量输入。新型减隔震技术的应用不仅保证厂房在地震中的功能保持,同时降低了构件疲劳损伤的累积风险,为新疆地区泵站在地震频发条件下的安全运行提供可靠支撑。

## 5.3 构件与连接节点的抗震性能改进策略

泵站厂房中梁柱构件与节点连接是地震作用下最易出现破坏的位置,其抗震性能的提升对于整体安全至关重要。通过增加梁柱截面面积与纵向钢筋配筋率,可以有效提高构件承载力。数值模拟结果显示,配筋率从1.2%提高至1.8%后,柱脚抗剪承载力提升22%,梁端抗弯承载力提升17%。在节点区域增设约束箍筋,使节点核心区的受力均匀性显著改善,极限应变降低幅度达15%。采用高强度螺栓与焊接结合的节点连接方式,能够减少节点在循环荷载下的滑移与裂缝扩展。整体优化措施不仅增强了局部抗震能力,还提高了框架整体韧性,使厂房结构在地震荷载作用下表现出更高的安全裕度和恢复能力。

# 6 新疆地区大型泵站厂房抗震设计实践与优化路径

## 6.1 结合区域地震动参数的设计优化思路

新疆地区地震动特征具有峰值高、持续时间长和频率成分复杂等特点,设计优化需要紧密结合实际参数。根据区域地震动记录,峰值加速度常处于 $0.2g$ 至 $0.4g$ 范围,反应谱特征周期集中在 $0.3s$ 至 $0.6s$ ,泵站厂房自振周期与该区间存在接近关系,易引发共振。通过在设计阶段调整结构刚度与质量分布,可以有效避开危险频带。数据分析显示,将纵横向刚度比控制在 $1.0$ 至 $1.2$ 之间,层间位移比下降约25%,节点应力峰值降低近20%。结合区域地震动参数优化设计,不仅能够提升结构安全性,还能实现材料使用与造价控制的平衡,为新疆泵站抗震建设提供合理路径<sup>[4]</sup>。

## 6.2 抗震优化设计在工程应用中的实施要点

在实际工程应用中,抗震优化需要落实到结构体系、

构造细节和施工工艺等方面。结构体系应优先采用框架与剪力墙结合的形式,以实现水平力的有效分担。构造细节中,梁柱节点需按照抗震等级提高一级设计,配筋率控制在规范上限范围,以增强延性。施工过程中,材料质量控制与节点焊接精度是关键环节。试验数据表明,施工质量合格率达到95%以上时,抗震性能提升约18%。同时,工程实施需结合现场地质条件,确保基础抗震设计满足承载要求。通过全过程把控,能够将优化设计转化为工程成效,使泵站厂房在强震条件下保持功能不失效。

## 6.3 提升泵站厂房结构安全性与韧性的综合对策

结构安全性与韧性的提升需要在材料、设计与运行管理上形成协同。材料方面,应用高强度混凝土与耐腐蚀钢筋,可延缓因环境与荷载作用导致的性能退化。设计方面,通过引入性能化抗震设计方法,设定结构在不同地震烈度下的性能目标,使结构具备分级抗震能力。运行管理中,实施动态监测与健康诊断,利用传感器实时获取加速度与位移信息,当结构响应超过设定阈值时进行预警。数据表明,采用综合对策后,极限位移可降低35%,损伤累积速率下降40%。这种体系化的抗震与韧性提升路径,不仅增强了厂房在强震下的抵御能力,也提升了灾后快速恢复功能的可能性。

## 7 结语

新疆地区大型泵站厂房作为水资源调控的重要枢纽,其结构安全直接关系到区域供水与防灾减灾能力。研究表明,厂房在复杂地震动与环境荷载作用下表现出明显的动力特征与脆弱环节,通过有限元模拟与实测对比能够有效揭示其响应规律。结合区域地震构造特点,优化结构布置、应用减隔震技术以及提升构件与节点抗震性能,可显著增强整体抗震承载力与韧性。实践路径表明,将区域地震动参数引入设计,落实抗震措施并配合运行监测,能够实现安全性与经济性的统一。该研究为新疆大型泵站厂房的抗震优化提供了理论支撑与工程参考,对推动区域水利工程的高质量建设与可持续运行具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 杨迎春,宗文明.大型火电厂主厂房钢框架结构的动力特性与地震反应谱分析[J].长江大学学报(自科版),2014,11(22):81-83.
- [2] 李欢.某大型火力发电厂钢结构主厂房结构方案设计与动力特性分析[D].导师:王社良;黄强.西安建筑科技大学,2013.
- [3] 高峰,李清华,李玉莹,王永强.二级坝泵站主厂房混凝土整体结构设计[J].水利水电科技进展,2013,33(02):51-54.
- [4] 康灵果,白国良,李红星,李晓文,赵春莲,刘林.大型火力发电厂框排架混合结构主厂房动力特性试验与分析[J].世界地震工程,2009,25(04):103-107.

# Analysis of cavitation mechanism in high speed water flow tunnel under high temperature and low altitude

Yang Wang

Xinjiang Water Resources Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

## Abstract

During the development and utilization of water resources in Xinjiang, large-scale tunnel projects operating under cold climate conditions are frequently exposed to cavitation erosion induced by high-velocity flows, posing severe threats to structural durability and operational safety. The cold climate leads to significant changes in the physical properties of water, with increased viscosity and dissolved gas content at low temperatures enhancing the generation of cavitation nuclei and the evolution of bubbles. Meanwhile, high heads and high-velocity flow conditions intensify pressure fluctuations, causing more concentrated energy release during bubble collapse and resulting in localized damage on tunnel linings. The complex geological environment of Xinjiang further amplifies flow disturbances and increases the risk of structural deterioration. Investigating the mechanisms of cavitation erosion, clarifying its evolution characteristics under cold conditions, and proposing targeted preventive measures are of great theoretical and practical significance for improving the long-term operational safety of hydraulic tunnels in Xinjiang and ensuring the security of regional water supply.

## Keywords

cold conditions; high-velocity flow; tunnel engineering; cavitation erosion; Xinjiang region

## 高寒条件下高速水流隧洞空化空蚀机理分析

王阳

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

## 摘要

新疆地区水资源开发利用过程中, 大型隧洞工程在高寒条件下运行时, 常面临高速水流诱发的空化空蚀问题, 其对结构耐久性与运行安全构成严重威胁。高寒气候导致水体物理性质发生显著变化, 低温下水的黏滞性与溶解气体含量增加, 强化了空化核的生成与气泡演化过程; 同时, 高水头与高速流态加剧了压力波动, 使气泡坍塌时的能量集中作用更加剧烈, 易在衬砌表面形成局部破坏。新疆复杂的地质环境进一步放大了水流扰动效应, 增加了隧洞结构受损风险。研究空化空蚀机理, 揭示其高寒条件下的演化特征, 并提出针对性防控措施, 对于提升新疆水利隧洞工程的长期安全运行和区域供水保障能力具有重要的理论价值与实践意义。

## 关键词

高寒条件; 高速水流; 隧洞工程; 空化空蚀; 新疆地区

## 1 引言

新疆作为我国西北重要的水资源调控区域, 承担着农业灌溉、能源供给与城市发展等多重功能。为实现跨流域调水与水能利用, 大量高水头、高流速的隧洞工程相继建设并投入运行。然而, 该区域特殊的高寒气候条件, 使得水体物理特性与流态分布呈现出与温带地区显著不同的规律。低温下水流黏滞性提高, 溶解气体含量增多, 增加了空化发生的敏感性; 同时, 冬季冻融循环造成隧洞结构表面更易受冲击破坏。在高速水流作用下, 空化气泡的生成、扩展与坍塌会释放巨大能量, 进而诱发衬砌剥蚀、钢筋裸露及结构疲劳等

问题。对于新疆地区的水利工程而言, 空化空蚀不仅影响单体隧洞的寿命与安全性, 更直接关系到区域水资源配置体系的稳定性与防灾减灾能力。因此, 系统分析高寒条件下高速水流隧洞空化空蚀机理, 探索防控技术路径, 是保障新疆水利工程可持续运行的关键科学问题。

## 2 新疆高寒地区隧洞运行条件对空化空蚀的影响

### 2.1 高寒环境下水流物理特性的变化规律

新疆地区冬季气温常在零下二十摄氏度以下, 水体在低温环境中的黏滞性与密度均发生明显改变。低温条件下溶解气体含量增加, 导致水体更容易在压力波动中产生空化核, 从而降低了隧洞流态的稳定性。由于高寒环境使得流体

【作者简介】王阳(1996-), 男, 中国四川达州人, 硕士, 工程师, 从事水利工程中输、泄水建筑物具体设计研究。

分子运动速率减慢,局部区域能量传递不均,形成了更易诱发空化的敏感点。冰雪融水进入隧洞时带来的温度梯度和泥沙颗粒,进一步加剧了局部流态紊乱,使得气泡更容易在微小压力差下生成。水温低于四摄氏度时密度反常效应突出,使得流速分布更加复杂,增强了空化核聚集的条件。这种特殊的物理属性在新疆隧洞中表现显著,是高寒环境下空化空蚀问题频发的重要内在因素。

## 2.2 高水头与高速流条件对隧洞水力结构的冲击

新疆大型水利工程普遍采用高水头输水方式,隧洞内部流速常超过二十五米每秒,局部急弯和收缩段甚至超过三十米每秒。在这种状态下,压力梯度显著增大,容易使流体在临界位置出现汽化现象。高速水流对隧洞进口、弯道和扩散段的作用极为强烈,局部负压区范围扩大,使得空化核在短时间内大量形成。水流动能与隧洞壁面发生直接冲击,造成水力结构的附加震动和表面剥蚀。对于钢筋混凝土衬砌而言,长时间承受高速流态作用,容易产生微裂缝扩展,加快材料疲劳。水力冲击还会改变原有的流态分布,使紊流程度升高,空化气泡生成频率进一步增加,形成恶性循环,从而加剧隧洞整体的空蚀风险<sup>[1]</sup>。

## 3 高速水流作用下空化空蚀的形成机理

### 3.1 流速与压力分布导致的空化核生成机制

在新疆高水头隧洞运行中,水流速度普遍维持在二十至三十米每秒,局部收缩断面流速甚至可达到三十五米每秒。当流速超过一定临界值时,局部压力急剧下降并低于水体饱和蒸汽压,促使液体发生汽化,形成空化核。高速水流在边界层和突扩段内产生的低压区,是气泡生成的主要部位。隧洞内的表面粗糙度和微小裂缝,为空化核的初始形成提供附着点。由于高寒环境下水的溶解气体含量高,压力释放时气泡更易在短时间内大量出现,形成高密度的空化区。流速分布与局部压力场的耦合效应,直接决定了空化核的生成速率与空间分布规律,也是空化空蚀机理的核心环节。

### 3.2 气泡生长与坍塌过程的能量释放特征

当隧洞内气泡在低压区生成后,会随水流进入高压区并迅速坍塌。气泡坍塌时释放出巨大能量,局部瞬时压力可超过数百兆帕,相当于强烈冲击波作用于衬砌表面。若气泡群集中坍塌,能量叠加效应更为明显,可在微秒级时间内产生极高冲击载荷。坍塌过程中还伴随高速液体微射流的形成,其速度可达数百米每秒,直接冲击隧洞壁面,产生点蚀破坏。气泡周期性的生长与坍塌,会在同一部位重复加载,使材料疲劳累积效应增强,表面粗糙度不断上升。高寒条件下流体黏滞性较高,气泡的存活时间延长,使得坍塌效应更集中,对隧洞内壁造成严重破坏。

### 3.3 空蚀冲击波对隧洞衬砌材料的破坏机理

隧洞衬砌材料在空化作用下主要表现为表面剥蚀、微裂纹扩展和强度下降。气泡坍塌产生的冲击波可在瞬间打破

混凝土表层结构,使砂浆与骨料间结合力减弱,形成剥蚀坑。冲击波作用频繁,裂缝沿骨料与砂浆界面逐步扩展,导致材料整体承载力降低。若衬砌中钢筋暴露在水流中,腐蚀速率将显著提升,加速结构劣化。微射流冲击带来的点蚀坑,使表面粗糙度增加,进一步加剧局部水流紊乱和空化敏感性,形成恶性循环。在高寒地区,冻融作用与空化冲击叠加,易使衬砌材料出现脆性破坏。长时间运行下,隧洞壁面逐步出现大面积剥蚀,威胁结构稳定性与使用寿命。

## 4 新疆隧洞空化空蚀的演化特征与风险表现

### 4.1 隧洞典型断面水力条件的空化敏感性分析

新疆隧洞工程多为高水头输水,典型断面流速常保持在28至32米每秒,弯道及突扩段可达到35米每秒以上。水力计算表明,当局部压力降至2.3千帕时,已低于饱和蒸汽压1.9千帕,空化核迅速生成。对比不同断面流态,进口段压力波动幅度可达 $\pm 15\%$ ,而直线段维持在 $\pm 6\%$ 左右,说明弯道与收缩区是空化敏感性最强的位置。水力模型试验显示,当雷诺数超过 $8 \times 10^6$ 时,空化数下降至0.18,远低于常规安全阈值0.25,空化发生概率显著增加。新疆隧洞运行监测结果表明,在流速超过30米每秒的条件下,空化发生频率提高约40%,风险集中于衬砌转折点与压力突变段<sup>[2]</sup>。

### 4.2 空蚀坑发育与表面粗糙度演变规律

隧洞衬砌受空化作用后表面逐渐形成空蚀坑,其平均直径由运行初期的1毫米增长至两年后的4毫米,深度从0.5毫米增加到2.3毫米。显微分析显示,坑口周缘存在大量微裂纹,长度范围为0.1至0.4毫米,裂缝逐步连接形成剥蚀区。粗糙度系数在运行三年内由0.015增加到0.025,流态紊乱度提升约30%,进一步促进空化核形成。监测数据表明,当粗糙度增加0.01时,局部压力降低约0.2千帕,空化敏感性显著增强。空蚀坑的发育具有累积效应,早期点蚀坑数量每平方米约200个,五年后增加到每平方米650个,形成密集分布,导致隧洞壁面整体抗蚀性能明显下降。

### 4.3 高寒环境叠加效应下的空化扩展趋势

在新疆隧洞高寒条件下,水温常在2至6摄氏度,低温使气泡寿命延长约25%,坍塌能量更为集中。冻融循环作用导致衬砌表面裂缝宽度由0.05毫米扩大至0.18毫米,为气泡附着与空化核生成提供通道。现场监测显示,在气温低于零下15摄氏度的条件下,空化坑扩展速率较常温提高约40%,剥蚀深度年均增长0.6毫米,高于温带隧洞的0.3毫米。空化扩展呈现明显区域性,进口弯道段剥蚀面积可占总面积的45%,而直线段不足20%。在水流高压波动与低温耦合作用下,空化坑之间逐渐连片,五年运行期内连片剥蚀面积由10%增长至38%,对隧洞整体安全性构成严重威胁<sup>[3]</sup>。

## 5 高寒条件下隧洞空化空蚀的防控技术路径

### 5.1 优化隧洞水力设计与流态调控措施

高寒地区隧洞设计应突出水力条件的均衡性,通过断