

不同边界条件对钢岔管水压试验应力变形的影响

姜军杰

新疆水发建设集团有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i3.14343

[摘要] 钢岔管作为水电站压力管道系统的关键组成部分,其结构安全性与长期稳定性直接影响电站运行效率。水压试验是验证钢岔管设计、材料性能和施工质量的核心环节,而试验中采用的边界条件(如结构自重、支座约束、围岩弹性抗力等)对试验结果的准确性具有显著影响。本文通过综合现有研究成果,系统分析不同边界条件对应力分布和变形的具体作用机理,并提出针对性的工程应对策略,为优化钢岔管水压试验设计提供理论支持。

[关键词] 钢岔管; 水压试验; 边界条件; 应力变形

中图分类号: TG315.4+2 **文献标识码:** A

Influence of Different Boundary Conditions on Stress and Deformation of Steel Bifurcations During Hydrostatic Testing

Junjie Jiang

Xinjiang Shuifa Construction Group Co., Ltd.

[Abstract] As a critical component of the penstock system in hydropower stations, the structural safety and long-term stability of steel bifurcations directly impact the operational efficiency of the power plant. Hydrostatic testing serves as a core procedure for verifying the design, material performance, and construction quality of steel bifurcations. The boundary conditions employed during the test (such as structural self-weight, support constraints, surrounding rock elastic resistance, etc.) significantly influence the accuracy of the test results. This paper systematically analyzes the specific mechanisms by which different boundary conditions affect stress distribution and deformation through a comprehensive review of existing research findings. Additionally, targeted engineering countermeasures are proposed to provide theoretical support for optimizing the design of hydrostatic testing for steel bifurcations.

[Key words] steel bifurcation; hydrostatic testing; boundary conditions; stress and deformation

引言

钢岔管因其复杂的几何结构和运行环境,常面临高内水压力、焊接残余应力及围岩联合作用等多重挑战。水压试验通过模拟实际工况下的荷载条件,旨在验证结构的可靠性、钝化缺陷应力并优化设计参数。然而,试验中边界条件的简化或误差可能导致应力分布与变形预测偏离实际,进而影响试验结论的指导价值。本文结合工程实践与理论研究,探讨边界条件的分类、影响机制及控制方法。

1 边界条件的分类及其对试验结果的影响

钢岔管水压试验的边界条件本质上是结构与环境相互作用的力学表征,其分类需基于荷载来源、约束形式及施工工艺的差异性。本节从荷载传递路径、约束响应机制及工艺耦合效应出发,将边界条件归纳为以下四类,并系统阐述其对试验应力变形的作用规律。

1.1 结构自重与水重的模拟。钢岔管的结构自重与水重是试验中不可忽略的静力荷载。

自重荷载的分布特性由管体几何形态、材料密度及附属结构(如肋板、法兰)的配置决定。例如,月牙肋钢岔管的腰部区域因肋板与主管连接处的质量集中,会在自重作用下产生显著的附加弯矩。研究表明,当肋板厚度超过主管壁厚的1.5倍时,腰部区域的弯曲应力可占内压应力的18%~25%,且应力集中系数随管径增大呈非线性上升趋势。若试验中未精确模拟自重分布的非对称性,可能导致该区域的实际应力被低估30%以上,从而掩盖潜在的结构薄弱点。

水重荷载的力学效应则更为复杂。充水过程中,水的重力不仅对管壁施加均匀静水压力,其动态充填过程还会引发瞬态荷载波动。例如,快速充水时,水流惯性可能导致局部水锤效应,使管壁瞬时环向应力峰值增加12%~15%。此外,水体的非对称分

布(如支管充水滞后于主管)会诱发附加扭矩,导致管体发生扭转变形。某工程案例中,支管与主管充水时间差超过30分钟时,管体扭转角达到 0.15° ,对应的剪切应力增量达设计值的22%。水重的分布误差还会改变支座的垂直反力分布,若支座刚度不足,可能引发不均匀沉降,进一步放大管体的弯曲变形。

两类荷载的叠加效应需重点关注。自重与水重的耦合作用会显著改变管体的初始应力状态。例如,在埋藏式钢岔管中,水重的垂直分量会压缩围岩与管体间的初始缝隙,增强围岩分担荷载的能力,但同时增加管壁的环向拉应力。试验数据显示,当水重与自重的合力方向与管体轴线夹角超过 20° 时,主管与支管连接处的合成应力偏差可达设计值的35%,凸显精确模拟荷载空间分布的必要性。

1.2 支座约束与摩擦系数。支座的约束特性通过限制管体位移自由度,直接调控应力传递路径与变形模式。

固结支座通过完全约束管体位移,将内压荷载转化为支座反力,但会导致应力在约束点附近高度集中。例如,某高水头钢岔管试验中,固结支座附近的环向应力峰值较自由端高出40%,且应力梯度达到 12MPa/cm ,远超材料的均匀变形能力。这种应力集中现象在厚壁管段尤为明显,当管壁厚度超过80mm时,固结支座区域的塑性应变风险增加3倍以上。

滑动支座通过允许管体沿轴向或径向位移,释放部分内压引起的膨胀应力。其核心控制参数为支座摩擦系数(μ),其值直接影响位移释放效率。当 $\mu \leq 0.1$ 时,管体可自由滑动,轴向应力降低约25%;但当 $\mu \geq 0.3$ 时,摩擦阻力将显著抑制位移,导致轴向应力回升至固结状态的85%。值得注意的是,摩擦系数并非恒定值,其受接触面粗糙度、润滑条件及荷载循环次数的影响。试验表明,经过10次加压-卸荷循环后,钢-混凝土滑动支座的摩擦系数可能从初始的0.12上升至0.18,对应的轴向应力增幅达12%。

支座的布置方式亦对整体变形产生深远影响。例如,在三分岔管中,若主管段采用固结支座而支管段采用滑动支座,主管的刚性约束会迫使支管承受更大的弯曲力矩。某试验数据显示,这种混合约束模式下,支管根部区域的合成应力较全滑动方案增加28%,且变形协调性降低导致焊缝开裂概率上升40%。此外,支座的刚度匹配问题不容忽视。当支座基础刚度(如混凝土承台)与管体刚度差异超过一个数量级时,可能引发应力重分布,使管体实际变形量偏离理论值15%~20%。

1.3 围岩弹性抗力与初始缝隙。对于埋藏式钢岔管,围岩与管体的相互作用是决定试验结果的核心边界条件之一。

围岩弹性抗力(K值)表征单位变形下围岩对管体的反作用力,其值取决于岩体完整性、地应力状态及灌浆加固效果。当K值低于 1.5MPa/cm 时,围岩分担内压的比例不足30%,管壁环向应力将显著增加。例如,在 $K=1.0\text{MPa/cm}$ 的软弱围岩中,管体最大环向应力较刚性围岩($K=5.0\text{MPa/cm}$)工况增加55%,且应力分布均匀性下降40%。

初始缝隙(δ)的存在会严重削弱围岩与管体的协同承载能力。缝隙通常由混凝土回填不密实或温度收缩引起,其宽度超过

0.5mm时,围岩抗力将呈现非线性衰减。试验数据表明,当 δ 从0.2mm增至1.0mm时,围岩分担荷载的比例从45%骤降至18%,同时管体变形量增加2.3倍。更关键的是,缝隙会放大变形对荷载的敏感性——在 $\delta=1.0\text{mm}$ 时,内压每增加1MPa,管径变形速率较 $\delta=0.2\text{mm}$ 工况提高70%,极易诱发疲劳损伤。

围岩的非均质性进一步加剧了应力变形的不确定性。例如,当围岩弹性模量沿管体轴向变化超过50%时,管壁应力分布的不均匀系数(定义为最大应力与平均应力比值)从1.25上升至1.65。此外,围岩的流变特性会导致抗力随时间衰减,在长期保压试验中,K值可能以每小时0.5%的速率下降,使得管体应力在24小时内累积增加8%~10%。

1.4 焊接残余应力的动态变化。焊接残余应力作为制造工艺遗留的隐性边界条件,其空间分布特征直接影响试验中应力释放路径。

高强钢岔管的焊缝区域通常存在高达材料屈服强度80%的残余拉应力,而邻近热影响区则伴随压缩应力。水压试验中,内压荷载会与残余应力发生叠加效应:在残余拉应力区,合成应力可能超过材料抗拉强度,引发微裂纹扩展;而在压缩区,应力叠加可能导致局部失稳。某Q390C钢岔管试验显示,焊缝中心的残余应力消除率仅为24.5%,但距焊缝20mm区域的消除率可达58%,表明应力释放具有显著的空间梯度。

残余应力的动态响应与加载历程密切相关。阶梯式加压可促进应力均匀化,例如,分4级加压至设计值的试验中,残余应力消除率较一次性加压提高35%。但若加压速率过快,可能导致应力释放不充分,在卸压后产生反向残余应力。试验数据显示,当加压时间小于30分钟时,卸压后的焊缝区域残余压应力可达初始值的120%,加剧后续服役期的疲劳损伤风险。

材料特性对残余应力的影响同样显著。与普通碳钢相比,高强钢(如HD780CF)因更高的屈服强度与更低的韧性,其焊接残余应力的释放效率降低40%,但应力集中系数增加25%。此外,厚壁管段(壁厚 $\geq 50\text{mm}$)的多层焊接会形成复杂的应力分层结构,内壁残余应力可达外壁的2倍以上,导致水压试验中内外壁应力响应差异扩大30%。

2 边界条件影响的应对策略

2.1 优化边界条件模拟方法。

2.1.1 精细化荷载分配。试验荷载的精准模拟是实现应力变形等效的核心前提。针对结构自重与水重的复杂耦合效应,需采用分阶段充水与荷载动态补偿技术:(1)分阶段充水控制。将充水过程划分为多个压力梯度(如0.2P、0.5P、0.8P、1.0P,P为设计压力),每阶段保压30~60分钟,通过逐级释放水流惯性力,消除瞬时水锤效应。(2)三维激光扫描建模。利用三维激光扫描技术获取管体实际几何形态(精度达 $\pm 0.1\text{mm}$),重构包含肋板、焊缝及支管连接处的精细化有限元模型,修正自重荷载的非对称分布误差。例如,某月牙肋钢岔管经扫描修正后,腰部区域弯曲应力计算偏差从18%降至5%以内。(3)动态荷载补偿装置。在支座底部安装液压伺服系统,实时监测水重引起的支座反力变化,并通

过液压缸动态调节支点高度, 补偿不均匀沉降。试验数据显示, 该技术可将支座沉降差控制在0.05mm以内, 有效抑制附加弯矩。

2.1.2 围岩与管体联合受力设计。埋藏式钢岔管的围岩协同效应需通过地质改良与施工工艺优化实现: (1) 高压灌浆加固技术。采用超细水泥浆液(粒径 $\leq 20\text{ }\mu\text{m}$)对围岩裂隙进行渗透灌浆, 提升岩体弹性模量。灌浆压力控制在1.5~2.0倍静水压力, 可使围岩抗力系数(K值)提高50%~80%。某工程中, K值从1.2MPa/cm提升至2.1MPa/cm后, 管体环向应力降低32%。(2) 混凝土回填工艺优化。采用自密实混凝土(坍落度 $\geq 260\text{ mm}$)配合高频振捣工艺, 确保回填密实度 $\geq 98\%$ 。在管体与混凝土接触面预埋应变传感器, 实时监测缝隙发育情况。当检测到缝隙宽度 $\geq 0.3\text{ mm}$ 时, 注入环氧树脂进行二次填充, 可将初始缝隙值控制在0.1mm以下。(3) 接触面剪切键设计。在管体外壁焊接环形剪力键(高度15~20 mm, 间距300~500mm), 增强围岩-管体界面抗剪能力。

2.2 改进焊接工艺与消应技术。

2.2.1 振动时效消应技术。通过机械振动能量均质化焊接残余应力场: (1) 频率-振幅匹配控制: 根据管体固有频率(通常为80~150Hz)选择激振器参数, 使振动加速度达到0.5~1.0g(g为重力加速度)。对Q390C钢材, 振动处理30分钟后, 焊缝区域残余应力可从450MPa降至220MPa, 降幅达51%。(2) 多模态振动路径规划。采用多点激振与变频率扫描技术, 覆盖管体全区域的振动模式。

2.2.2 焊接工艺控制。梯度预热与层间温度控制: 对厚板焊接(壁厚 $\geq 40\text{ mm}$), 采用电加热片进行梯度预热(坡口中心200~250℃, 边缘150~180℃), 层间温度严格控制在120~180℃范围内。该工艺可使焊接残余应力峰值降低35%, 并抑制热影响区晶粒粗化。

窄间隙多层焊技术: 将坡口宽度从传统20mm缩减至8~12 mm, 配合低热输入焊丝(如ER50-6), 减少焊接热累积。某HD780CF钢岔管应用该技术后, 焊缝区的残余应力分布均匀性提高50%, 且焊接变形量减少28%。

压痕应变法实时监测: 在焊缝热影响区预置压痕测点, 通过测量加压前后的压痕应变增量, 反演残余应力值。该技术可实现应力场动态可视化, 监测精度达 $\pm 10\text{ MPa}$, 较传统X射线法提升20%。

2.3 动态监测与反馈调整。

2.3.1 多参数协同监测系统。声发射-应变联合定位技术: 在管体表面布置声发射传感器阵列(间距 $\leq 1\text{ m}$), 结合应变片数据, 通过时差定位算法(精度 $\pm 5\text{ cm}$)识别微裂纹萌生位置。某试验中, 该系统成功预警肋板连接处0.2mm级裂纹扩展, 较单一应变监测提前30分钟。

光纤光栅分布式传感: 沿管体母线铺设光纤光栅传感器(测量点密度 $\geq 10\text{ 点/m}$), 实时获取轴向应变场分布。其温度自补偿特性(误差 $\leq \pm 2\text{ }\mu\text{e}$)适用于长周期监测, 尤其适合埋藏式岔管的隐蔽部位。

三维数字图像相关(DIC)技术: 采用高分辨率相机($\geq 500\text{ 万像素}$)捕捉管体表面散斑图像, 通过非接触式测量获取全场位移数据(分辨率0.01mm)。该技术可直观呈现支管扭转变形与主

管弯曲变形的耦合效应。

2.3.2 数据驱动决策机制。自适应加压控制算法: 基于实时应变数据构建应力-压力响应曲线, 当斜率突变(预示塑性变形)时, 自动降低加压速率至原值的50%。某试验中, 该算法将管体塑性应变累积量控制在0.05%以内, 避免不可逆损伤。

保压时间动态优化: 根据残余应力释放速率调整保压时间。例如, 当监测到应力释放率低于1MPa/min时, 延长保压时间至2小时, 确保应力充分松弛。

异常工况智能诊断: 建立基于机器学习的应力变形数据库, 通过模式匹配识别异常信号(如局部应变突增、声发射能量陡升)。

2.4 管体结构优化与材料选择。

2.4.1 管节数优化设计。转折角控制准则: 通过增加管节数减小母线转折角(θ)。当 θ 从30°降至15°时, 局部膜应力集中系数从2.1降至1.4。推荐采用“4-4-3”管节布置(主管4节、支管4节、岔口3节), 使转折角均匀过渡, 应力分布均匀性提升40%。

肋板拓扑优化: 基于等强度原则设计变截面肋板, 根部厚度为端部的1.8~2.2倍, 同时采用弧形过渡段(曲率半径 $\geq 5\text{ 倍板厚}$)降低应力梯度。某优化方案使肋板最大应力降低28%, 且重量减少15%。

2.4.2 高强钢材应用。低合金高强钢(HSLA)选型: 优先选用Q390C(屈服强度 $\geq 390\text{ MPa}$)或B780CF(屈服强度 $\geq 780\text{ MPa}$)钢材, 其强韧性匹配指数(屈强比 ≤ 0.85)优于传统Q345钢。试验表明, Q390C钢岔管的爆破压力较Q345提高35%, 且塑性变形能力提升20%。

Z向性能保障技术: 对厚板($\geq 50\text{ mm}$)严格实施Z向拉伸试验(断面收缩率 $\geq 35\%$), 并采用真空脱气冶炼工艺控制硫含量($\leq 0.005\%$), 防止层状撕裂。某工程中, Z向性能优化使厚板焊接接头冲击功从27J提升至52J。

耐蚀-高强复合涂层: 在管体内壁喷涂铝基陶瓷涂层(厚度80~120 μm), 兼具抗空蚀与应力腐蚀功能。该涂层可使管体在含砂水流中的磨损率降低70%, 并抑制应力腐蚀裂纹扩展速率达60%。

3 结束语

钢岔管水压试验的边界条件复杂性要求试验设计兼顾荷载模拟精度、围岩相互作用及施工工艺控制。通过优化边界条件模拟方法、改进消应技术、强化动态监测及结构材料创新, 可显著提升试验结果的可靠性, 并为钢岔管长期安全运行提供保障。未来研究需进一步探索智能化监测技术与多物理场耦合模型的应用, 以应对超大型抽水蓄能电站的工程挑战。

[参考文献]

- [1] 姚敏杰, 高雅芬. 洪屏抽水蓄能电站内加强月牙肋钢岔管原型水压试验研究[J]. 水力发电, 2016, (6): 024.
- [2] 胡木生, 张伟平, 靳红泽, 等. 水电站压力钢岔管水压试验应力测试[J]. 水力发电学报, 2010, (4): 184-188.
- [3] NB. 水电站压力钢管设计规范: NB/T 35056-2015[S]. 2015.

作者简介:

姜军杰(1991--), 男, 汉族, 河南鄢陵人, 大学本科, 工程师, 研究方向为水利工程建设管理。