

水电站压力钢管漏水诊断、成因分析及处理技术研究

尤军波

华电四川发电有限责任公司宝珠寺水力发电厂，四川 广元 628003

[摘要]压力钢管作为水电站输水系统的关键结构，其安全运行直接关乎机组发电效率和电站的长期运行安全。文中以宝珠寺电站压力钢管漏水缺陷为典型案例，系统分析了各类水电站压力钢管常见漏水问题的成因与特征。基于该电站压力钢管结构特点与现场泄漏情况，研究提出了涵盖焊缝检测与修复、灌浆孔探伤、进水口混凝土灌浆及效率试验接口封堵的综合治理技术方案。工程实施后，漏水点完全消除，结构强度符合设计要求，并已实现无异常连续运行，显著提升了设备可靠性与经济效益。结果表明，本研究建立的漏水诊断与成因分析方法能够实现隐患精准定位，相应处理技术具备良好的针对性与工程实用性，可为同类水电站压力钢管漏水问题的诊断与治理提供理论依据和工程参考。

[关键词]压力钢管；漏水诊断；检测修复；设备可靠

DOI: 10.33142/hst.v8i12.18466

中图分类号: TP39

文献标识码: A

Research on Diagnosis, Cause Analysis and Treatment Technology of Pressure Steel Pipe Leakage in Hydropower Station

YOU Junbo

Baozhusi Hydropower Plant of Huadian Sichuan Power Generation Co., Ltd., Guangyuan, Sichuan, 628003, China

Abstract: As a key structure of the water transmission system in hydropower stations, the safe operation of pressure steel pipes directly affects the power generation efficiency of the units and the long-term operation safety of the power station. The article takes the leakage defect of pressure steel pipes in Baozhusi Power Station as a typical case, and systematically analyzes the causes and characteristics of common leakage problems in pressure steel pipes of various hydropower stations. Based on the structural characteristics of the pressure steel pipe of the power station and the on-site leakage situation, a comprehensive treatment technology scheme covering weld detection and repair, grouting hole inspection, inlet concrete grouting, and efficiency test interface sealing has been proposed. After the implementation of the project, the leakage point has been completely eliminated, the structural strength meets the design requirements, and continuous operation without abnormalities has been achieved, significantly improving the reliability and economic benefits of the equipment. The results indicate that the leakage diagnosis and cause analysis method established in this study can achieve precise positioning of hidden dangers, and the corresponding treatment technology has good pertinence and engineering practicality. It can provide theoretical basis and engineering reference for the diagnosis and treatment of pressure steel pipe leakage problems in similar hydropower stations.

Keywords: pressure steel pipe; water leakage diagnosis; detection and repair; equipment reliability

引言

水电站作为清洁能源生产的核心基础设施，其输水系统的稳定运行是保障电力持续供应的关键。压力钢管作为连接水库与水轮机的“咽喉”构件，长期承受高压水流冲刷、介质腐蚀及温度应力等多重作用，漏水问题成为制约其安全运行的主要瓶颈。本文以典型漏水案例为切入点，构建多维度诊断体系，精准识别漏水类型；从设计、施工、运行全生命周期视角剖析成因；制定分类处理方案并通过工程实例验证效果，为压力钢管漏水问题的根治提供技术支撑。

当前关于压力钢管漏水处理的研究多集中于单一修复技术应用，如焊缝补焊、防腐涂层升级等，缺乏对漏水现象的系统分类、成因的深度溯源及处理方案的针对性设计。部分研究存在诊断手段单一、成因分析笼统等问题，

导致处理方案针对性不足，出现“反复修、反复漏”的现象。本研究可填补该领域的工程实践空白。

1 电站简介

宝珠寺水电站位于四川省广元市三堆镇，是嘉陵江水系白龙江干流上已建的第二个梯级水电站。电站共装设4台混流式水轮发电机组，机组单机容量175MW，由东方电机有限公司负责设计与制造。1996年第一台机组发电，1998年四台机组全部投产发电。该电站是以发电为主，在所在区域电力系统中，主要承担调峰、调频及事故备用等重要功能，同时兼有灌溉、防洪等效益综合利用的大型国家重点工程。

宝珠寺水电站11F机组压力钢管伸缩节处于2021年3月份出现漏水（详见附图1），水压较高时漏水量可达5~10L/min，严重影响机组安全及发电效益。压力钢管为钢

焊接结构，一共有 67 节钢板焊接而成（详见图 2 压力钢管剖面），压力钢管的材料牌号为 A3（Q235A）和 16Mn 钢板，材料焊接性好，详见表 1 压力钢管管壁材料。



图 1 压力钢管漏水

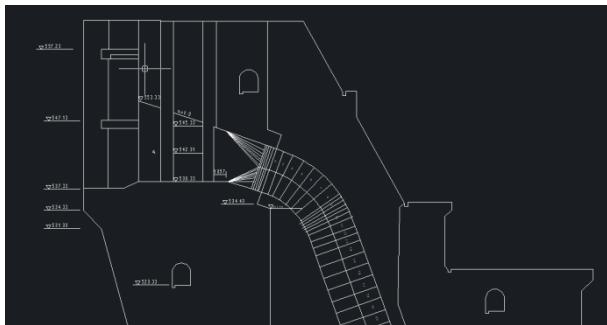


图 2 压力钢管剖面图

表 1 压力钢管管壁材料

管号	管节编号	钢管内直径 (mm)	钢材品种	钢板规格 长×宽×厚	节数 (节)
上斜直段	1	7000	A ₃	9000×1800×16	1
上弯段	2~11	7000	A ₃	9000×1800×16	10
斜直段	12~20	7000	A ₃	9000×1800×18	9
	21~27	7000	A ₃	9000×1800×20	7
	28~32	7000	A ₃	9000×1800×22	5
	33	7000	A ₃	9000×1800×25	1
下弯段	34~47	7000	A ₃	9000×1800×25	14
下水平段	48	7000	16Mn	9000×1800×25	1
	49~53	7000~6000	16Mn	9000×1800×25	5
	54~57	6000	16Mn	9000×1800×25	4
明管段	58~67	6000	16Mn	9000×1800×28	10

2 压力钢管漏水成因分析

通过对国内 12 座不同装机容量（50~1200MW）、不同投运年限（8~40 年）水电站的压力钢管漏水案例进行调研，结合漏水位置、形态及严重程度，将典型漏水现象

划分为 4 类，具体特征如下：

（1）焊缝开裂漏水：多发生于环向焊缝、纵向焊缝及管节拼接焊缝处，漏水形态呈线状或喷射状，水压较高时漏水量可达 5~20L/min。此类漏水易伴随焊缝附近管壁振动，严重时出现焊缝扩展裂纹，是最危险的漏水类型。调研案例中，此类漏水占比达 42%，主要集中于投运 20 年以上的钢管。

（2）管壁腐蚀穿孔漏水：漏水点呈点状或蜂窝状，漏水量随穿孔直径（0.5~5mm）增大而增加，多分布于钢管底部及水流冲刷区域。部分案例中，腐蚀区域伴随锈层剥落，管壁厚度从设计值 16~25mm 减薄至 8~12mm，已低于安全运行阈值。此类漏水在含沙量较高的河流流域水电站中占比超 50%。

（3）接头密封失效漏水：主要发生于法兰接头、伸缩节等连接部位，漏水形态呈面状渗漏或滴漏，漏水量相对稳定，一般为 0.1~5L/min。密封件老化、变形或螺栓松动是主要表现特征，此类漏水占比约 15%，但易引发接头部位腐蚀加剧。

（4）附属结构破损漏水：涉及排气阀、排水阀、支撑件等附属部件与钢管连接部位，漏水多因部件老化、密封垫损坏或连接焊缝开裂导致，漏水量差异较大，占比约 11%。

为分析宝珠寺水电站压力钢管漏水水源，利用 11F 机组大修期间，全落机组检修门，检查发现漏水减小，待压力钢管余水排尽后，伸缩节漏水情况消失。基于上述机组压力钢管漏水典型案例，结合宝珠寺电站漏水现象及压力钢管结构，从设计、施工、运行、材料及运维 5 个维度，剖析宝珠寺电站压力钢管漏水问题的核心成因为：

（1）焊缝开裂漏水：压力钢管焊缝存在未焊透、夹渣等缺陷，水电站调峰运行导致水流压力频繁变化并受温度应力影响，焊缝处产生疲劳应力，经多次循环后出现疲劳裂纹并扩展。

（2）压力钢管灌浆孔锈蚀穿孔漏水：腐蚀穿孔主要源于电化学腐蚀与机械磨损的协同作用，钢管表面形成酸性腐蚀环境，发生析氢腐蚀反应，加速管壁锈蚀。汛期沙量较高的水流对管壁产生冲蚀，破坏防腐涂层，暴露的基体金属快速腐蚀。

（3）压力钢管进口段混凝土与钢板接缝间隙偏大，导致机组发电用水进入压力钢管与混凝土之间，水压过大则将导致压力钢管变形或钢管漏水。

（4）效率试验预埋管路锈蚀穿孔漏水：宝珠寺电站 在设计阶段参照了 20 世纪 50 至 60 年代苏联的技术标准，其压力钢管系统内设置有水轮机效率试验孔，并经由预埋管路引至水轮机层。该预埋管路采用普通碳钢材质，在长达约 30 年的运行过程中，受水力、环境及材料老化等因素影响，部分管段已出现锈蚀，局部甚至发生穿孔。压力钢管内高压水流可经锈蚀孔洞渗出，并沿压力钢管外壁与

混凝土衬砌之间的间隙蔓延，形成持续性漏水现象。

3 分类处理方案实施

根据现有成因开展针对性处理方案实施：

3.1 压力钢管焊缝检查处理：

3.1.1 压力钢管焊缝检查：

(1) 对焊缝及其附近范围进行打磨，除去铁锈、油污等杂质，以满足探伤要求，然后进行 100%UT 探伤，标记出缺陷（位置、长度、深度）。

(2) 对焊缝和母材进行外观检查，标记出缺陷（位置、长度）。

(3) 对引水钢管与混凝土脱空情况进行检查。

3.1.2 焊缝缺陷处理工艺：

(1) 缺陷不需要清穿钢板

①采用碳弧气刨或打磨的方法清理缺陷。用碳弧气刨将缺陷由尾部（距离缺陷尾部约 10mm）向缺陷方向进行刨除，刨除后坡口示意图如图 3。气刨表面需打磨，去除气刨痕迹（去除渗碳层）。

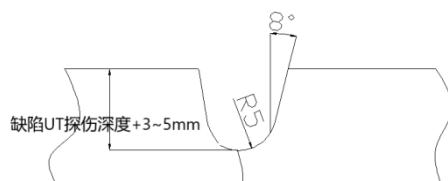


图 3 刨除后坡口示意图

②焊接坡口，要求多层多道焊，见图 4。

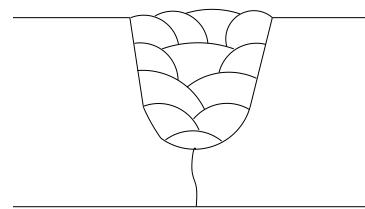


图 4 焊接坡口示意图

(2) 缺陷需要清穿钢板

①不更换钢板

a.采用碳弧气刨或打磨的方法清理缺陷。用碳弧气刨将缺陷由尾部（距离缺陷尾部约 10mm）向缺陷方向进行刨除，刨除后坡口示意图如图 5。气刨表面需打磨，去除气刨痕迹（去除渗碳层）。

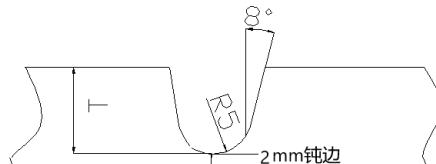


图 5 刨除后坡口示意

b.焊接坡口，要求多层多道焊，见示意图图 6，间隙大于 3mm 时，采用镶边焊进行焊接，见示意图图 7，间

隙小于 3mm，再进行焊接，UT 探伤时，根部 5mm 不考核，应记录该部位，便于后序停机检修时，UT 探伤复查。

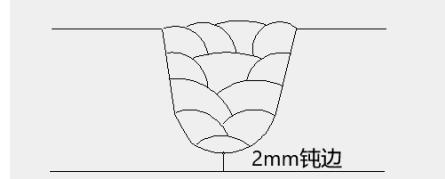


图 6 多层多道焊

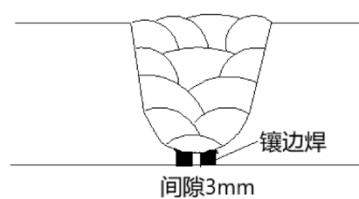


图 7 镶边焊

②更换钢板

a.采用气割的方法割除原钢板（尺寸不小于 300mm×300mm，如图 8 所示），坡口示意图如图 9。气割表面需打磨，去除气割痕迹（去除渗碳层），清理周围混凝土，将垫板放置，镶块钢板下料、成型，装配镶块钢板，同时，装配垫板如图十所示，间隙不超过 2mm。

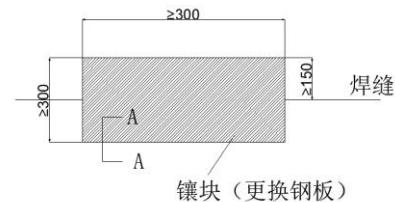


图 8 钢板尺寸

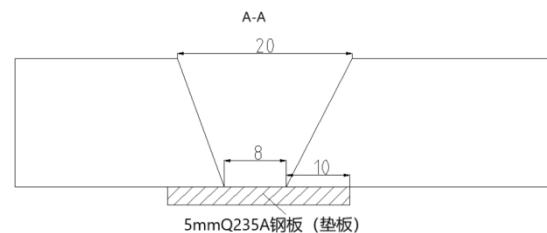


图 9 焊接剖口示意图

b.焊接坡口，要求多层多道焊，见图 10。

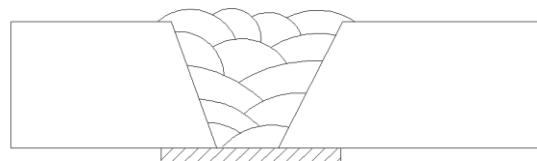


图 10 多层多道焊

3.1.3 焊缝表面的修磨

①对焊缝表面进行修磨，要求与母材齐平，粗糙度不

低于原表面。

②局部凹陷部位进行补焊、打磨。

3.1.4 探伤检查

对修复焊缝部位及附近 50mm 范围按 ASME 标准进行 100% (UT+MT 或 PT) 探伤。

3.1.5 灌浆

引水钢管修复后, 通过锤击法检查引水钢管脱空区域, 根据土建单位经验采用砂浆和化学灌浆方式, 灌浆养护期过后, 检查脱空区小于国家规范规定, 具体步骤:

①确定脱空隐患部位范围。

②沿脱空隐患部位在钢板上按土建单位要求间距打孔, 确定孔的位置、孔深、孔径。

③土建单位依据国家规范和流程进行灌浆。

④灌浆养护期过后, 按国家规范规定检查。

⑤合格后割管, 采用焊接方式将管口完全封堵, 剖面示意图见图 11。

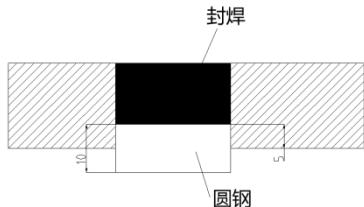


图 11 封堵剖面示意图

压力钢管焊缝检查处理, 包含压力钢管本体环缝、纵缝焊缝及技术供水出水口焊缝的探伤、修复, 虽有部分未焊透、夹渣、气孔等缺陷, 但并不是引起压力钢管漏水的原因。

3.2 压力钢管灌浆孔锈蚀穿孔漏水检查处理

在压力钢管焊缝检查处理时, 根据压力钢管设计图纸, 对压力钢管灌浆孔进行打磨、探伤, 未发现异常。

3.3 压力钢管进口段混凝土与钢板接缝间隙检查处理

机组大修期间, 检查发现压力钢管进口段混凝土与钢板接缝存在约 5mm 的分缝, 该分缝可能会引起压力钢管漏水。处理工艺为:

3.3.1 接缝清理

清除接缝处的表面浮泥等杂物, 并将结构缝内沥青木板或其他填充物抠除。

3.3.2 埋设灌浆管及嵌缝

沿接缝处圆周布置骑缝孔, 孔间距 50cm, 间距可适当调整, 以不破坏钢筋为原则, 垂直钻孔, 孔深约 20mm, 孔径 12mm。沿缝周刻槽, 槽内、缝内填充 MS-1086T 水下弹性环氧密封胶作为嵌缝。

3.3.3 灌浆处理

使用便携式注浆泵向灌浆孔内灌注环氧化学灌浆料。灌浆压力不超过 0.4MPa, 立面灌浆顺序为由下向上; 平面可从一端开始, 单孔逐一连续进行、当相临孔出浆后,

保持压力 3~5min, 即可停止本孔灌浆, 改相邻灌浆孔。灌浆按照侧墙→顶拱→底板的顺序进行。在规定灌浆压力下, 不吸浆或注入率连续 3 个读数值均 $<0.1\text{L}/\text{min}$, 即可结束灌浆, 进行闭浆。灌浆结束后, 对钻孔应采用快速堵漏剂进行封孔, 保证钻孔不漏水。

3.4 效率试验预埋管路检查处理

本次排查采用“水轮机层接口加压-压力钢管内部观测”的组合检测方式: 在水轮机层效率试验管路接口处接入压力清洁水, 通过加压方式模拟实际运行工况, 同时安排人员进入压力钢管内部及伸缩节部位进行全程观测。该检测方案的优势在于可直接定位泄漏点, 且能直观反映泄漏程度, 为后续处理提供精准依据。

试验实施过程中, 观测人员发现泄漏点: 一是压力钢管内部效率试验预留接口处有明显出水现象; 二是压力钢管与伸缩节的连接部位存在持续性渗水。该观测结果直接印证了此前推测的“压力钢管效率试验预埋管路锈蚀穿孔是导致泄漏的核心原因”, 为问题根源诊断提供了实测依据。

首先对压力钢管内部效率试验预留孔采用手工电弧焊进行封堵处理, 焊接完成后, 采用超声波探伤 (UT) 对焊缝进行 100% 无损检测, 检测结果符合无损检测验收标准, 确保封堵质量。

4 处理效果验证

为验证处理效果, 进行了压力钢管充水试验及机组带负荷试运行验证: 充水至设计压力后稳压 24h, 伸缩节无渗漏; 机组在额定负荷下连续运行 72h, 通过红外热像仪及渗漏观测仪监测, 各关键部位密封性能稳定, 伸缩节处渗漏现象彻底消除。

5 结论与展望

本文以宝珠寺电站 11F 机组压力钢管伸缩节漏水问题为研究切入点, 聚焦漏水核心成因诊断与分类修复技术开展系统性研究。通过整合典型漏水现象观测、钢管结构特性分析及现场实测验证的技术路径, 形成针对性解决方案并完成工程实践, 主要研究结论如下:

第一, 明确了压力钢管漏水的多源诱发机制并实现彻底修复。针对机组压力钢管存在的多元漏水隐患, 通过分区域专项排查与处理: 焊缝缺陷部位采用焊接修复+无损探伤验证, 灌浆孔实施密封补强处理, 进口段混凝土与钢管接缝开展针对性防渗处理, 尤其是效率试验预埋孔通过焊接封堵, 系统定位并解决了各泄漏点。经压力钢管充水稳压 24h 及机组 72h 额定负荷试运行验证, 伸缩节及各处理部位漏水现象彻底消除, 验证了成因诊断的准确性及修复方案的有效性。

第二, 突破传统惯性诊断思维, 构建了“现象-结构-全生命周期”的问题分析框架。在梳理典型漏水现象及常规成因的基础上, 结合 11F 机组压力钢管实际结构参数及运行年限特征, 从设计选型匹配性、施工焊接质量控制、

长期运行维护缺陷等全生命周期角度开展深度分析。通过“针对性检测-精准定位-分类修复-效果验证”的闭环实践，形成适配老旧调峰电站压力钢管的漏水处理技术体系，为同类电站相似问题提供了可直接借鉴的工程实践范例。

在新能源大规模并网的能源结构转型背景下，我国水电站功能定位已从传统“基荷发电”向“调峰填谷、灵活调频”的综合能源调节核心转变。宝珠寺电站作为区域关键调峰电站，原设计系统在“宽工况、高变幅”运行需求下逐渐暴露出适应性不足问题，具体表现为变负荷过程中机组振动幅值增大、压力钢管压力波动频率升高，既加剧了泄漏等故障风险，也对运行稳定性提出更高要求。基于本研究成果及电站发展需求，提出以下展望：

其一，开展效率试验检测系统升级改造。现有预埋管路检测方式存在密封性维护难度大的问题，建议改用超声波流量计搭建非接触式检测系统。该方案可避免预埋管路泄漏对检测精度的影响，同时结合电站“宽工况”运行特点，选取覆盖低负荷、额定负荷、超负荷的多工况点进行标定，进一步提升不同运行状态下效率检测的精准度，为机组运行优化提供数据支撑。

其二，建立压力钢管全生命周期安全监测体系。依托本研究形成的泄漏检测技术，构建“定期检测-数据留存-趋

势预警”的常态化监测机制：采用超声波探伤与红外热成像联合检测技术，每年开展一次压力钢管焊缝、伸缩节及关键接缝的全面检测；建立检测数据档案库，对比分析不同运行周期的结构性能变化规律；针对调峰运行中压力波动剧烈的特点，增设压力传感器实时监测管内压力变化，设定异常波动阈值实现故障提前预警，延长压力钢管服役寿命。

[参考文献]

- [1] 马文亮.加劲压力钢管变形后加固方案设计与分析[M].北京:中国水利水电出版社,2016.
- [2] 中华人民共和国水利部.水电站压力钢管设计规范(SL 281-2023)[S].北京:中国水利水电出版社,2023:2-3.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.承压设备无损检测 第1部分:超声波检测(NB/T 47013.1-2015)[S].北京:新华出版社,2015:4-5.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.水轮发电机组安装技术规范 GB/T8564-2003[S].北京:新华出版社,2003:2-3.

作者简介：尤军波（1986.2—），毕业院校：河北工程大学，所学专业：热能与动力工程，当前就职单位：宝珠寺水力发电厂，职务：工程管理部副主任，职称级别：动力工程师。