

某水利枢纽工程压力钢管钢岔管带支管进行整体水压试验的施工方法

穆晓东 李涛

中国水利水电建设工程咨询西北有限公司 QBT 监理中心, 新疆 阿勒泰 836500

[摘要]文中介绍了 QBT 水利枢纽工程引水发电系统压力钢管钢岔管及支管在洞内整体水压试验方法, 通过支座、变径节及配套闷头等试验装置, 实现压力钢管钢岔管与支管在岔管洞内整体进行水压试验, 解决了钢岔管在洞内分片安装后需在安装现场进行水压试验的难题, 同时通过钢岔管带支管及部分主管整体进行水压试验, 能更充分的检测管道内部缺陷, 更大限度地保证钢岔管焊接及后期运行质量。

[关键词]水利水电工程; 压力钢管; 洞内整体水压试验方法

DOI: 10.33142/ect.v4i1.18853

中图分类号: TV732.4

文献标识码: A

Construction Method for Overall Hydrostatic Testing of Pressure Steel Pipes, Steel Bifurcations, and Branch Pipes in a Certain Water Conservancy Hub Project

MU Xiaodong, LI Tao

QBT Supervision Center of Sinohydro Construction Engineering Consulting Northwest Co., Ltd., Altay, Xinjiang, 836500, China

Abstract: This article introduces the overall water pressure test method for the pressure steel pipe steel bifurcation and branch pipes of the QBT water conservancy hub project's water diversion and power generation system in the tunnel. Through the use of test devices such as supports, variable diameter joints, and matching muffles, the pressure steel pipe steel bifurcation and branch pipes are tested as a whole in the bifurcation tunnel, solving the problem of water pressure testing on the installation site after the steel bifurcation pipe is installed in sections in the tunnel. At the same time, by conducting water pressure tests on the steel bifurcation pipe with branch pipes and some main pipes as a whole, internal defects of the pipeline can be more fully detected, and the welding and later operation quality of the steel bifurcation pipe can be guaranteed to the greatest extent.

Keywords: water conservancy and hydropower engineering; pressure steel pipe; method for overall water pressure test inside the tunnel

引言

水利水电工程压力钢管钢岔管水压试验, 通常在制作厂内进行, 然后将钢岔管整体运输到岔管洞内安装。在洞内岔管分片安装及水压试验很少有相关施工成功经验可借鉴, 而且全部在洞内施工存在吊装困难、安全风险高、焊接环境差、运输吊装通道限制等诸多不利因素。采用岔管带支管及部分主管的整体水压试验, 是一种兼具检验与提升功能的综合性验证方法。一方面能有效暴露结构存在的缺陷, 并检验其整体安全度。另一方面, 在可控的缓慢加载过程中, 能使既有缺陷的尖端产生塑性钝化, 降低焊接残余应力。这不仅能验证钢岔管的焊接质量, 更能从实质上改善其受力状态, 从而确保其长期运行的安全性与可靠性。

1 工程概况

QBT 水利枢纽工程引水发电系统压力钢管采用“两洞四机”的布置型式, 由 2 条主管(分为上平段、上弯段、斜井段、下弯段、下平段)、钢岔管及 4 条支管组成, 主管内径 6.8m, 支管内径 4.2m, 管壁材质为 Q345R 和 07MnMoVR, 加劲环材质为 Q345R, 主管和支管通过 Y 型钢岔管连接, 岔管材质为 SX780CF (钢岔管基本参数

见表 1, 钢岔管具体结构见图 1。两个钢岔管为 Y 型月牙肋钢岔管, 材质 SX780CF, 管壁板厚 60-62mm, 月牙肋板厚 124mm, 主管进水口内径 6.8m, 支管出水口内径 4.2m, 公切球直径 7.84m, 岔管整体外形尺寸: 长 8.388m, 宽 10.324m, 高 8.126m, 总重量 103t。

表 1 岔管基本参数表

项目	1 岔管	2 岔管
岔管型式	对称 Y 形	对称 Y 形
边界条件	洞内埋管	洞内埋管
岔管分岔角 ω ($^{\circ}$)	75	75
公切球半径 (mm)	3740	3740
最大直径处腰线转折角 C0 ($^{\circ}$)	6	6
钝角区腰线转折角 C1 ($^{\circ}$)	6	6
支管腰线转折角 C2 ($^{\circ}$)	8.43	8.43
主锥板厚/肋厚 (mm)	62/124	62/124
钢材型号	SX780CF	SX780CF

2 水压试验目的

为保障压力钢管的长期运行安全, 钢岔管现场焊接完成后, 需在洞内带支管及部分主管进行整体水压试验, 并进行焊接残余应力测试和水压试验过程中应力测试, 具体

试验目的如下：

(1) 水压试验可以超载内压暴露结构缺陷并提早处理，验证压力钢管整体安全度，为压力钢管的长期安全运行提供可靠保证。

(2) 水压试验可以削减压力钢管内部焊接残余应力及不连续部位的峰值应力，在加压时可能到达屈服，卸载后这些应力得到削减。

(3) 在水压试验缓慢加载的过程中，钢管内部缺陷尖端逐级发生塑性变形，从而使缺陷尖端发生钝化（微小的塑性变形），卸载后产生预压应力，提高结构的抗疲劳能力。

3 水压试验布置

3.1 水压试验场所

岔管现场组装焊接后在安装作业面进行水压试验，采用岔管带支管及部分主管在洞内进行整体打压。因岔管带两条支管水压试验注水体积较大，注满水后总重约 2200t，

为了满足水压试验时地基的承载要求，岔管安装前，在岔管底部的基岩上浇筑 60cm 厚的混凝土底板，并预埋锚筋和钢板凳。

3.2 水压试验范围

水压试验范围包括钢岔管（含上游 1 节主管）和 2 条支管段带部分主管，每个岔管（含上游 1 节主管）与 2 条支管组合后一并进行水压试验（见图 2），采用 1 套主管大闷头和 2 套支管小闷头用于管口的封堵。岔管上游进口端、下游出口端的支管端头均已预留闷头连接段，对于管节直径与闷头大小不同的情况，使用锥管（渐变段）进行过渡。闷头与上游进口端连接所需配割裕量，预留在岔管上游的第 1 个主管单元节上，预留余量 100mm；闷头与下游出口端连接所需配割裕量，预留在支管下游侧的 a22 单元节上，预留余量 100mm，试验完毕后切除余量。

试验范围：钢岔管（b1~b6）管节、上游主管、1#及 2#支管（a1~a22 节）。

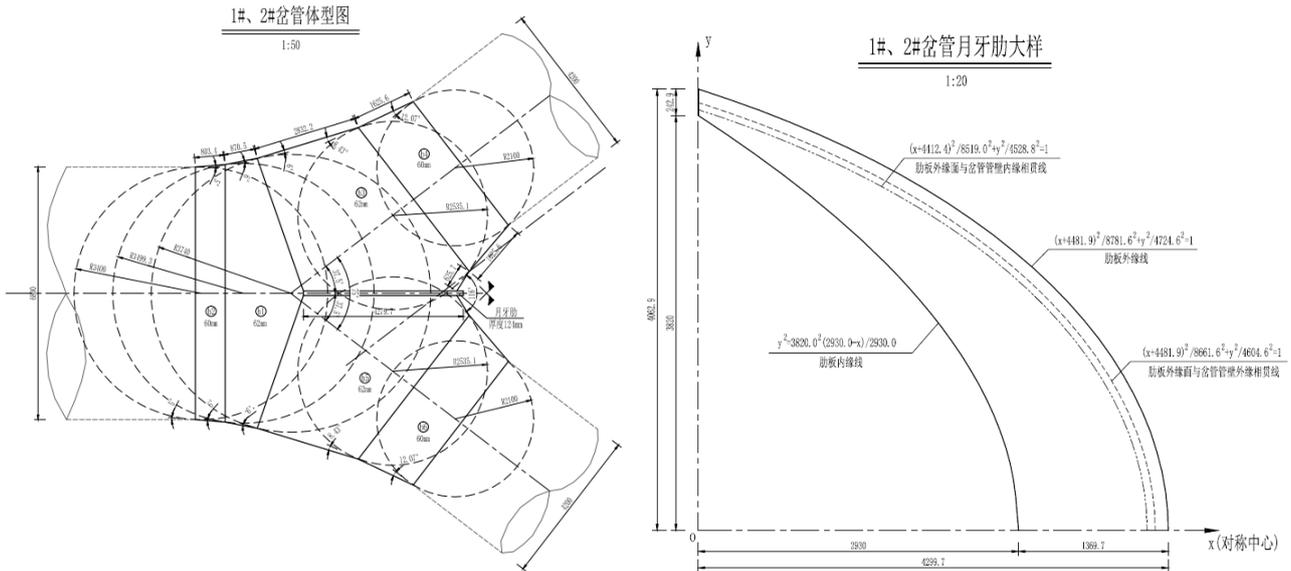


图 1 Y 型钢岔管结构设计图及月牙肋大样图

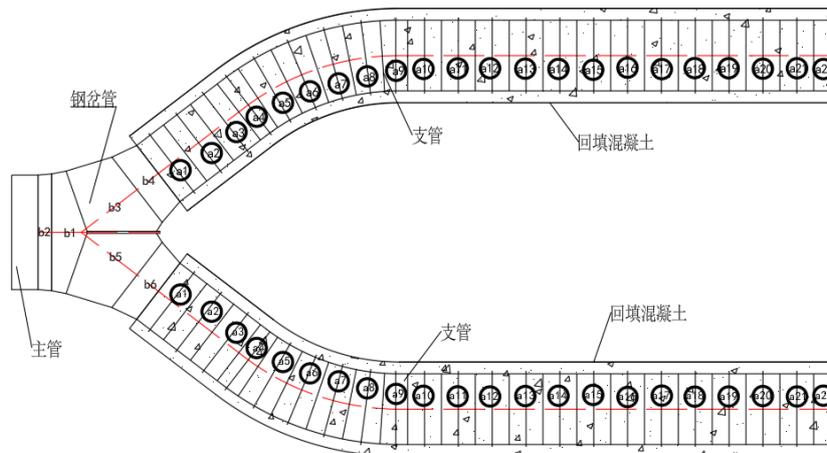


图 2 钢岔管及支管带部分主管整体水压试验范围图

3.3 水压试验装置

3.3.1 支撑布置及设计

由于岔管与支管整体水压试验的管段长度较长、体型较大，根据岔管体型结构、自重和注水重量，结合现场实际空间布局、相关试验要求等，拟在岔管底部安装鞍形支座支撑。岔管体支座沿大管口对称布置见图 3。

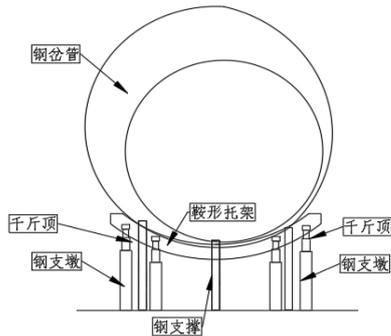


图 3 鞍形托架布置图

支座采用马鞍形，支座为 I20 工字钢（支座间用 I16 工字钢连成一个整体，增加支座稳定性），用于承担岔管、水等自重（见图 4）。在支座两侧需布置有放倾倒的钢斜撑，而鞍形托架需与地面的预埋钢板焊接固定。试验前，支管外壁需回填混凝土与四周围岩形成整体，确保水压试验时管道的稳定性和安全性。

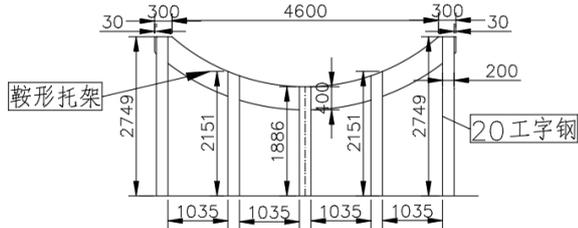


图 4 鞍形托架支撑图

水压试验前将所有与钢岔管焊接的内部、外部支撑断开，使钢岔管处于无约束的平衡状态，允许钢岔管在水压

试验时自由变形。支座与钢岔管外壁相接处部位用厚度为 10mm 的聚四氟乙烯板衬垫、填实。

3.3.2 闷头及过渡段设计工艺

岔管上游进口端、下游出口端的支管端头均已预留闷头连接段，对于管节直径与封头大小不同的情况，使用锥管（渐变段）进行过渡。闷头在专业厂家进行采购，设计和制造由闷头厂家完成，变径节采用锥管过渡与岔管母材相连接，共布置大闷头一个配套变径节一套，小闷头二个配套变径节二套（见图 5）。岔管主管口大闷头由 2# 施工支洞用台车运输到位后整体顶升安装，运输安装方法同岔管安装方法一致，支管口两个小闷头由厂房部位塔机直接吊装到位进行安装。闷头的设计及计算文件后续单独报送进行补充。

在大闷头变径锥管左中心线偏上位置，预留直径 500mm 的进人孔，以便进行最后一条闭合焊缝的焊接岔管及闷头安装焊缝焊接、检验完毕后，进行进人孔的封堵及焊接，采用单面焊双面成型焊接方法，在变径锥管外壁进人孔处焊接最终封堵焊缝。

3.3.3 水压试验设备布置

在主管封堵闷头（大闷头）变径节 A1 顶部设置补排气管、阀，通过布置连通管，将岔管最高处的位置连通到补排气管上，充水时，可将管道内最高处的空气排出。在主管封堵闷头变径节 A1 上部设置一套充水管/阀、下部设置一套注压水泵和一套排水阀，在注压泵的管路上设置一个逆止阀、在变径节的最低处设置排水阀，不得使用排水阀代替逆止阀。考虑岔管排水量大，其支管封堵闷头（下游游侧闷头）变径节 A2 下部也设置一套排水阀，加快岔管水压试验后的排水疏水速度。在主管封堵闷头外侧设一台电动往复泵及检测主管岔管应力、应变等设备。在支管变径节 A2、A3 附近设检测支管应力设备。变径节 A1 和 A2、A3 下部，各引出一条用于测应力、应变的出线装置，整体水压试验设备布置见图 6。

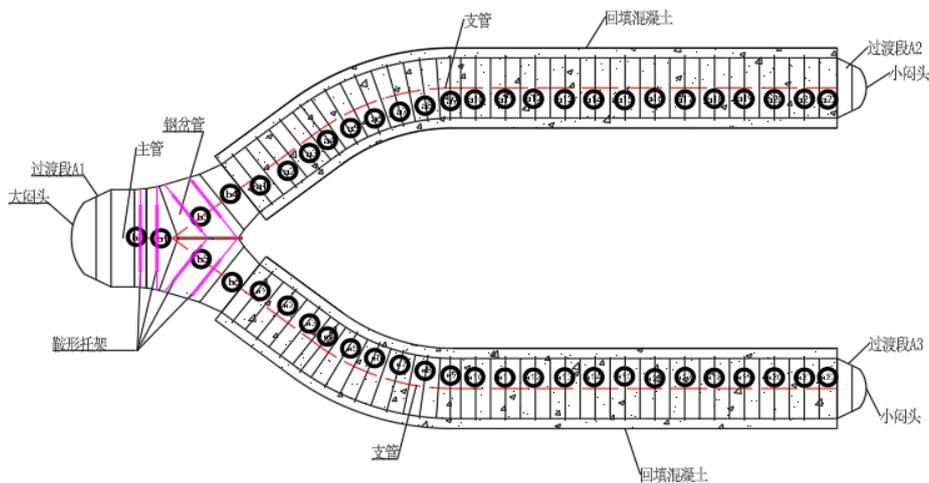


图 5 整体水压试验闷头及过渡段布置图

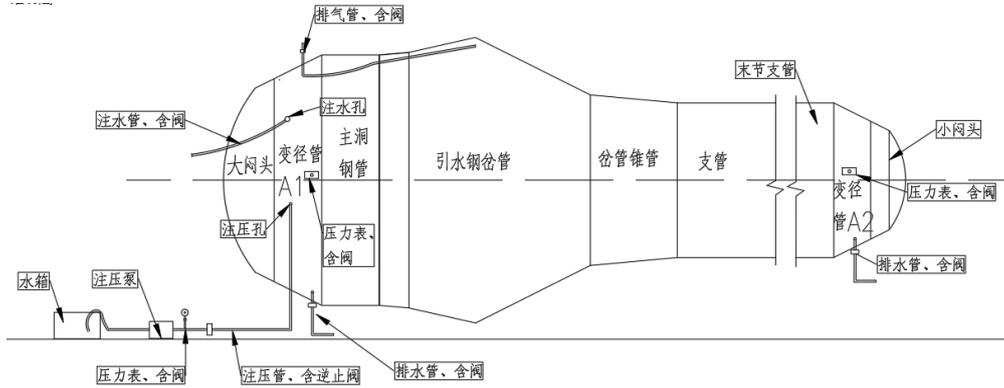


图6 岔管水压试验设备布置图

4 水压试验

4.1 试验前的准备

(1) 试验前，岔管的主岔管和支管端头均应预留连接段，连接段预留长度应满足闷头切割要求，连接段强度应满足水压试验要求，闷头与岔管间的连接段钢管的制作、安装要求按《水利水电工程压力钢管制造安装及验收规范》(SL432—2024) 执行。

(2) 充水前，应对结构上的焊疤、划痕等缺陷进行全面排查，及时修补处理。

(3) 用于水压试验的所有仪器仪表应提前进行率定，观测设备、千分表、应力应变测试装置安装和调试完毕后，应经验收合格方可投入使用。

(4) 由于水压试验全程在洞内进行，现场应配有足够的照明设施。

(5) 水压试验应在气温、水温 5℃ 以上的环境中进行，试验前应仔细检查当天的气温、湿度、风向、风力等并进行详细记录。

4.2 水压试验步骤

(1) 开启排气阀，关闭排水阀。

(2) 开启充水阀向试验区进行充水，流量控制在 20m³/h 以下，避免造成结构失稳等不利影响，排气阀溢水后关闭充水阀，然后关闭放水阀。

(3) 充水时，在其最高处应设置排气管阀，加压前必须排气。通气孔的孔径应与充水流量相匹配，风速不应大于 50m/s。试验完毕后管道放空流量的大小应满足闷头不失稳和通气孔风速限制的要求。

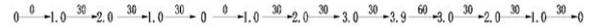
(4) 充水 1h 后方可对各监测设备、压力表进行读数，同时应全面接缝和闷头等薄弱部位有无水汽泡和渗漏情况，并记录；过程中应安排专人检查支撑结构的变形或位移等异常情况并及时加固、处理，并做好记录。

(5) 水压试验过程中，如出现渗漏等异常情况需要处理时，应开启排气阀、排水阀，先将管内压力卸至零、管道内部水体排空后，方可进行修补处理，若无异常情况可进入下一步试验。

4.3 水压试验过程

整体水压试验通过高压水泵进行泵水加压，加压过程

应缓慢，升压速率不得超过 0.05MPa/min。在每次加压操作前均应安排专人记录各监测设备、压力表、千分表及应变仪读数。当加压至最大压力后，在稳压的时间段里，每间隔 20min 进行一次观测数据的记录。试验过程中，如果出现渗漏等异常情况，应将管内水压缓慢降至零压力，降压速率也不得超过 0.05MPa/min，然后开启排气阀、排水阀，将岔管内水体排空后再进行渗漏处理；若无异常情况可进入下一步试验。高压水泵加压及降压按图 7 分段进行。



说明：1、表中箭头上方的数字为加压后的稳定时间，单位“分钟”；

2、其它数字为高压水泵的加压压力，单位“MPa”；

3、压力变化速率不得大于 0.05MPa/分钟；

4、稳压时间共计 5.5 小时。

图7 整体水压试验压力表变化过程图

加压过程中应随时检查管壁及月牙肋最大应力值不超过表 2 中数值，否则应停止升压。

表2 整体水压试验岔管管壁及月牙肋最大应力值

试验压力 (MPa)	应力 (N/mm ²)			
	部位			
	岔管壁膜应力区 管壁	岔管壁局部应力 +弯曲应力	局部膜应力区	月牙肋
3.9	377.3	539	431.2	431.2

为保障试验效果，整体水压试验需要进行上述两个完整的压力循环过程。

4.4 卸荷及检查

(1) 按上述程序完成两个完整的压力循环过程后，就可以通过泄压控制阀以不超过 0.5MPa/min 的降压速率，分级将岔管内压力卸至自重压力，打开排（补）气管阀门进行排放作业。

(2) 整体水压试验后，所有焊缝应进行全面的无损探伤。

5 水压试验监测

5.1 监测要求

(1) 在测试仪器安装前，要求按仪器使用说明书及

有关规定对监测仪器设备进行检验率定,确保不合格的仪器不予使用。

(2) 监测仪器安装完成,并经监理人验收合格后,方可进行下一试验工序,应注意对已安装仪器设备和电缆线路的保护,以免造成观测数据缺失。

(3) 试验前,测读各仪器设备的初始数据,做好记录。

(4) 试验过程中,准确记录试验的相关边界条件和环境量,及时进行测试数据的计算整理分析,发现问题及时通报监理人。

5.2 焊接残余应力测试

5.2.1 焊接残余应力对高压压力钢管的影响

(1) 压力钢管在循环的水荷载作用下,若在应力集中部位(如焊缝、咬边处)存在残余拉应力,会加速裂缝的萌生和发展,显著降低管道的抗疲劳强度和使用寿命。

(2) 焊接残余应力与外载引起的应力相叠加,会使局部焊缝产生塑性变形,降低管道刚度,更严重的会使结构局部失稳,影响结压力钢管的整体稳定性。

(3) 焊接残余应力会导致焊缝腐蚀开裂,影响管道的耐久性。

5.2.2 焊接残余应力测试的方法

采用 X 射线衍射法测定焊接残余应力,能够针对同一被测结构件、同一被测区域和测点,在不同状态下(如焊后态、载荷试验后、振动时效后、热处理后),进行精确的、可重复的定位测量。通过精确定位(使用测点标记或三维坐标定位),确保了每次测量的都是完全相同的物质点,从而可以直接、准确地计算出该点残余应力的变化量,科学地评价处理工艺的有效性,该方法测量数据最大误差通常可控制在 $\pm 20\text{MPa}$ 以内。

5.2.3 钢岔管焊接残余应力测试

(1) 布置测区

为精确测定钢岔管焊接残余应力,在岔管下半部具有代表性的焊缝及其附近区域,布置 A、B、C、D、E 五个区域,用油漆标记出测试部位并编号,每个测区分别包含焊缝中心、熔合线、热影响区的测点,具体布置区域参见图 8 所示。

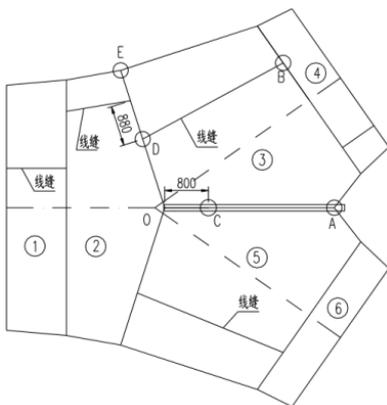


图 8 测试区域分布示意图

(2) 测区表面处理

使用角磨机磨平测区焊缝、抛光轮精细打磨,用饱和盐水作电解质进行电解抛光,直至消除磨痕、能清晰地分辨焊缝中心线、熔合线和热影响区为准。

(3) 测试时机

岔管充水试验前全区域测试 1 次,水压试验后,岔管内的水排干后再测试一次,水压试验前后相应点的残余应力测试值进行比较分析。

5.3 水压试验应力测试

5.3.1 测试准备

(1) 现场施工准备

钢岔管现场组装完成后,所有内部贴片、引线等埋设及试验区内部清理工作完成后,待上下游闷头封堵完毕,可进行应力测试布线施工。

(2) 应变片布置原则

测点布置应基于月牙形内加强肋岔管的受力特征展开,监测的重点区域包括钝角区、肋板附近的管壳区域及月牙肋板本体。同时,闷头与连接锥管段也需布置适量测点,具体布点原则如下:

①管壳测点:应在结构内、外壁面的同一位置对应布点,用以分离计算膜应力与局部弯曲应力分量。

②肋板测点:在月牙肋板的内缘侧面(管内)与外缘位置(管外)分别布置。

③布点密度原则:在应力梯度平缓的管段,测点可适度减少;在应力集中明显、梯度变化剧烈的区域(如钝角区、相贯线附近),则应加密布点。

④对称性利用:鉴于岔管结构通常上下对称,测点可集中布置于下半部分,所得数据通过对称原理推及整体。

⑤间距控制:仪器布设间距需根据预估应力场调整。一般环向间隔不宜超过 30 度;在钝角区等应力复杂部位,测点间距应加密,原则上不大于 300mm。

⑥试验单位需综合水压试验的具体要求与上述受力特征,制定详细的测点布置图。

[参考文献]

[1]雷海生,揭云丽.水电站压力钢管岔管制作与水压试验[J].西北水电,2015(9):7-8.

[2]梁艳,陈刚.新疆金沟河红山水库工程压力钢岔管整体水压试验[J].四川水利,2025(7):89-90.

[3]罗亚松.云南不管河三级电站 1 号卜形钢岔管设计及水压试验[C].第六届:全国水电站压力管道学术论文集,2006.

[4]SL/T 432—2024.水利水电工程压力钢管制造安装及验收规范[S].北京:中华人民共和国水利部,2024.

作者简介:穆晓东(1988.2—),毕业院校:河南科技大学,所学专业:建筑环境与设备工程,当前工作单位:中国水利水电建设工程咨询西北有限公司,职务:总监理工程师,职称级别:中级。