

乌弄龙水电站引水隧洞钢衬段施工技术

朱宝凡¹

(华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650000)

摘要: 乌弄龙水电站压力钢管在制造厂制作成单节运至安装间, 通过桥机吊运至引水隧洞在厂房上游墙的出洞口, 再用平板台车运输至洞内进行安装, 简化了运输方式, 实现了快速安装; 压力钢管运输与安装对比类似工程不用增加施工支洞扩挖工程量, 节约了工程投资; 钢衬段的第二阶段固结灌浆、回填及接触灌浆采用埋管灌浆, 做到了压力钢管不开孔、避免了高强钢开口灌浆后封堵困难且容易开裂的风险; 同时严格控制埋管灌浆工艺, 确保质量, 投运后的厂房上游墙无渗水, 说明引水隧洞设计及施工方案合理、工程质量好。

关键词: 乌弄龙水电站; 钢衬段; 施工技术

中图分类号: TV732.4

文献标识码: A

0 引言

目前国内大型水电站地下厂房引水隧洞普遍全洞采用钢筋混凝土衬砌, 其中下平段厂前约30~50m范围设钢衬, 钢衬段与蜗壳进口采用凑合节相连; 钢衬段含压力管道安装、回填混凝土、回填灌浆、固结灌浆和接触灌浆等工作内容, 其施工质量是控制厂房上游墙是否渗漏的关键, 且压力钢管运输和安装与土建及机电安装施工存在交叉干扰。乌弄龙水电站引水隧洞钢衬段施工采取了有效的技术措施减少了施工干扰, 同时做到了压力管道无渗漏。本文全面介绍了乌弄龙水电站引水隧洞钢衬段金属结构及土建工程施工经验, 供同行参考。

1 概述

乌弄龙水电站位于云南省迪庆州维西县巴迪乡境内, 为澜沧江上游水电规划7个梯级电站中的第2个电站, 电站装机容量990MW。乌弄龙电站共设有四条平行布置的引水隧洞, 每条引水隧洞由渐变段、上平段、上弯管、竖直段、下弯管、下平段及钢衬段组成。衬砌后洞径由9.20m在下平渐变段部位渐变为8.00m; 上平段洞轴线间距与进水口协调一致为24.00m, 下平段洞轴线间距与厂房机组段一致为27.50m。引水隧洞竖井至厂房段洞向SE140°, 洞室走向与岩层夹角约45°左右, 且洞室埋深大, 岩性主要为砂质板岩、泥质板岩(⊙P2a-Sb), 多为较坚硬岩, 构造不发育, 岩体完整性好, 为III2类围岩, 洞室稳定性较好, 仅局部边墙受构造或缓倾角裂隙切割。下平段围岩以III2类为主(约占洞室长度的80%), III1次之(主要分布与1#引水洞下平段)。

引水隧洞钢衬段位于厂上0+011.00m~厂上0+046.00, 每条全长35m, 开挖断面为直径10.40m的圆形断面。4条压力钢管长度均为36.5m, 内径均为8.0m, 单节最大轴线长度为3.0m, 压力钢管采用Q345C钢板制作, 板厚32mm, 压力钢管在压力钢管厂制作成单节后运输至安装现场进行安装, 4条引水隧洞压力钢管的总重量约为1138t。压力钢管钢衬段回填混凝土厚度1.1m, 衬砌后洞径8m, 采用C30W8F100钢筋混凝土结构(岩壁侧布设单层钢筋), 钢衬底部2m部分采用高流态自密实混凝土施工。

收稿日期: 2020-01-15

作者简介: 朱宝凡(1974—08), 男, 云南云县人, 高级工程师, 大学本科, 主要从事水电站建设管理工作, E-mail: 121621299@qq.com

压力钢管隧洞段灌浆分为固结灌浆、回填灌浆和接触灌浆。因目前国内采用高强钢压力钢管的多个水电站由于灌浆孔焊缝开裂，影响了工程运行发电[1]，本工程压力钢管灌浆采用不开孔方案；其中固结灌浆孔深6m，环内间距45°，排距2m，分两阶段施工，未安装钢管前先进行孔深1m以下的无盖重灌浆，然后每个孔引管出仓面，回填混凝土施工完毕后再进行孔口1m段有盖重灌浆。顶拱固结灌浆孔兼回填灌浆，回填灌浆范围为顶拱中心角120°内；接触灌浆为底部90°范围内。

引水隧洞钢衬段施工总体程序为：开挖支护结束→无盖重固结灌浆→安装钢衬→预埋灌浆管→回填混凝土浇筑→回填灌浆→引管固结灌浆→接触灌浆。

2 金属结构施工

2.1 压力钢管制造

压力钢管制造在乌弄龙电站现场钢管加工厂进行。以单节管节交付安装，最大安装单元重量约25t（不包含内支撑结构的重量）。压力钢管制造总体工艺流程为：施工准备→制造工艺规程编制→材料复验→材质确认、钢板划线→下料切割、坡口制备→瓦片压头、卷弧→组圆、纵缝焊接→纵缝检查、棱角No、探伤检查→加劲环组装焊接→加劲环焊缝检查→附件装焊→防腐处理→整体验收→出厂验收。

(1) 瓦片及附件制造

引水压力钢管板宽为3m，周长约25.236m，每节钢管由两块等长瓦片组成，瓦片长度约为12.618m，实际制作时按设计图纸下料制作。钢管瓦片制造主要包括板材质确认、划线、下料前的检验、下料、卷板前的检验；卷板和卷板后的检验等程序。钢管瓦片下料采用半自动切割机气割下料。瓦片纵缝及管段安装环缝的直线边焊缝坡口制备采用坡口切割机或者半自动切割机火焰切割方法制备，砂轮机打磨。钢管瓦片采用60mm×3500mm卷板机卷制弧度，卷板前须清除钢板的浮锈，卷板方向和钢板的压延方向一致。卷板后，将瓦片以自由状态立于平台上，用弦长1.5m的样板检查其弧度，样板与瓦片的间隙不大于2.5mm。

加劲环、阻水环下料切割采用TCD II 5000×1600F-(E)型电脑数控切割机进行火焰切割下料，下料空冷后，用弦长1.5m样板检查其内弧弧度，样板于内弧间隙不大于2.5mm。钢管支承座和其它加固支座均在钢管运输前按要求装焊于加劲环上。

(2) 钢管组圆焊接

管节组装在组圆平台上进行，用自行设计的专用夹具调整瓦片纵缝间隙和错位。1#~4#引水隧洞压力钢管设计为13个单节，一个单节作为一个制作单元，每条引水隧洞总共可分为13个制作单元节。

纵缝采用专用工装进行装配。纵缝焊接采用埋弧自动焊焊接工艺进行焊接，两条焊缝同时施焊。焊缝探伤主要采用超声波探伤仪进行探伤，辅助X射线探伤复验。纵缝棱角度矫正使用专用工装，校正后使用弦长0.8m弧度样板检查，样板于纵缝的间隙控制在4mm以内。钢管矫正完后，为防止变形，采用6~10跟钢管或者型钢进行内部支撑加固。

加劲环及阻水环由9片内弧长度约为2.92m的瓣片组焊而成，加劲环装配时使用专用工装进行装配。焊接前钢管需要调圆，并装配调圆架。加劲环及阻水环的焊缝焊接主要采用半自动CO₂气体保护焊焊接。焊接时，一般由5、6个工位对称施焊，且环板上、下要求交替进行焊接，以控制环板的垂直度。

(3) 压力钢管涂装施工

压力钢管内壁涂刷自养护的超厚浆型环氧沥青防锈底漆和面漆。钢管外壁均匀喷涂苛性钠水泥浆。对于厂房上游侧设置垫层的钢管段，其外壁防腐与内壁防腐一致。安装环缝两侧各100mm范围内，在表面预处理后，沿着钢管外壁一周用透明胶布缠绕。环缝焊接后，用钢丝轮进行二次除锈，再用人工涂刷钢管防锈漆。

2.2 压力钢管运输

压力钢管运输采用40t平板拖车以平卧的方式进行运输。压力钢管厂内布置一台32t龙门吊，龙门吊将压力钢管吊起落在40t平板拖车上，然后将压力钢管通过道路运输至安装部位。压力钢管厂内装车详见下图1所示。



图1 压力钢管厂内装车示意图

压力钢管运输至安装间后，用主厂房桥机进行卸车，卸车后通过桥机进行翻身，然后通过桥机将压力钢管立式运输至1#~4#引水隧洞与蜗壳连接处下放至轨道式（每条引水隧洞底布置轨距为3000mm的P38轨道）运输平板台车上，加固处理后通过5t卷扬机及平板台车将压力钢管运输至安装部位，临时加固存放。待一条引水隧洞的压力钢管全部运输完成后，将压力钢管调整至安装部位加固焊接。

2.3 压力钢管安装顺序

单条钢管以始装节为基准，依次组装相邻管节，安装环缝采用手工电弧焊。当压力钢管浇筑混凝土及灌浆完毕后，拆除压力钢管的内支撑，之后进行打磨平整处理，然后进行防腐处理，最后竣工验收。

每条引水的全部压力钢管运输到安装部位后，开始每条引水隧洞压力钢管的拼装焊接，每条引水隧洞的⑬号管节作为首装节，依次向上游开始安装，一条引水隧洞开展一个工作面，同时开展两个工作面。引水隧洞压力钢管安装顺序如下图2所示。

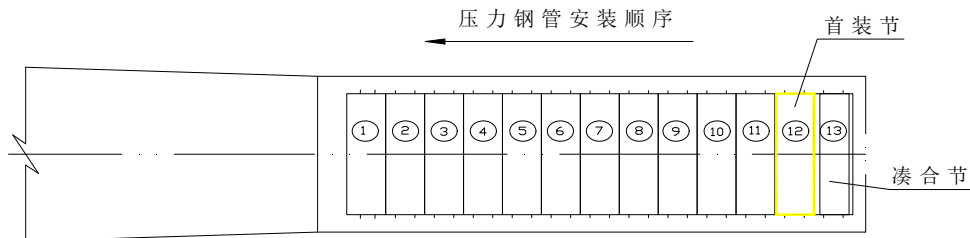


图2 引水隧洞压力钢管安装顺序示意图

2.4 压力钢管安装方法

先将待安装的压力钢管底部轨道位置用型钢焊接滑靴，然后将临时加固的支撑割除，用2个5t手拉葫芦将压力钢管移动到安装部位，调整到位测量合格后，用同样的方法安装下一节钢管，待拼装完成2条环缝之后开始焊接，边焊接边拼装码缝。焊接完成3条环缝并经验收合格后浇筑混凝土。混凝土浇筑完成达到凝期后，继续安装下一单元的压力钢管。

压力钢管现场安装焊缝主要采用手工焊。焊接材料选用大西洋牌的电焊条，严格按照焊条的说明书进行烘烤及保温。环缝焊接时采用6~8个人对称焊接，焊接速度等基本保持一致，水平线以下部分先焊接内壁，之后焊接外壁，最后进行盖面处理；水平线以上部分先焊接外壁，之后焊接内壁，最后进行盖面处理。焊接时用风铲锤击焊缝以免焊接收缩产生过大的拘束应力而引起移位变形。焊缝内部无损探伤采用超声波和TOFD探伤方法，无损探伤长度占焊缝全长百分比严格按照设计要求进行无损检测。首先进行超声波探伤，然后进行TOFD探伤复测。

3 回填混凝土施工

3.1 施工程序

压力钢管段混凝土回填紧跟钢衬安装进行，每条压力钢管段均由厂房侧开始施工。钢衬回填混凝土长度，根据钢管一次安装的节数确定，一般每安装3~4节钢管（9~12m）回填一次。除压力钢管段与渐变段相衔接的仓位分层浇筑外，其他仓位均采用全断面浇筑施工，钢衬底部2m部分采用高流态自密实混凝土（一级配）施工，以上泵送混凝土（二级配）。

3.2 混凝土施工方法

混凝土采用泵机入仓，混凝土浇筑时，在一侧堵头模板顶部预留进人孔，施工人员和泵管由预留孔进入仓内。在洞壁设置插筋，焊接钢筋爬梯，施工人员利用爬梯下至压力钢管两侧浇筑部位，并根据实际情况，设置插筋搭设竹跳板振捣操作平台。混凝土采用 $\Phi 50$ 、 $\Phi 70$ 软轴振捣器振捣，浇筑过程中，钢管两侧混凝土对称均匀上升，控制浇筑速度，并随时观测钢衬及封头模板变形情况。与渐变段搭接仓位，非钢衬段厂下0+041.00~厂下0+046.00m段采用定型模板，钢管承重排架及定型钢管桁架做支撑体系，钢衬段与非钢衬段相交部位应做好模板与钢衬间接缝严密。

其中自密实混凝土浇筑时，搅拌车卸料前应高速旋转60~90s，再卸入混凝土泵，以使混凝土处于最佳工作状态，泵送时应连续泵送，必要时降低泵送速度，浇筑时下料口应尽可能的低，尽量减少混凝土的浇筑落差。浇筑速度不要过快，防止卷入较多空气影响混凝土浇筑质量。

4 灌浆施工

4.1 施工总程序

压力钢管隧洞段灌浆分为固结灌浆（包括一阶段无盖重灌浆、二阶段有盖重灌浆）、回填灌浆和接触灌浆；其中二阶段有盖重灌浆、回填灌浆和接触灌浆采用预埋灌浆管（黑铸铁管）的方法施工。压力钢管隧洞段开挖支护完成后，在未安装钢管前先进行5m深的无盖重固定灌浆，钢管回填混凝土达到70%设计强度后对钢衬段顶拱120°范围内进行回填灌浆，回填灌浆结束7d后进行1m深的有盖重固定灌浆，钢管回填混凝土浇筑结束60d后对钢衬段底部90°范围内进行接触灌浆。

4.2 固结灌浆

固结灌浆孔深入基岩6m，环内间距45°，排距2m，分两阶段实施，第一阶段无盖重固结灌浆范围为5m深围岩，在支护结束后、压力钢管安装前实施，第二阶段有盖重固结灌浆范围为1m浅围岩，采用预埋灌浆管路施工，回填灌浆结束后、接触灌浆开始前实施。

第一阶段无盖重固结灌浆按环间分序，环内加密的原则进行施工，环间分一、二序，环内不分序，即固结灌浆按两序施工；灌浆时要求从低孔向高孔灌浆，同一环内的灌浆孔可并联灌浆，孔数不宜多于3个，孔位宜保持对称；一序孔灌浆结束并待凝72h后方可钻、灌二序孔。灌浆孔不分段，按全孔一次性钻灌施工，灌浆封堵孔塞放置在距离孔口75cm处。

第二阶段有盖重灌浆在回填混凝土备仓时提前预埋灌浆管路，预埋管路由进浆管（1.5"）、回浆管（1.5"）、进浆支管（1"）和回浆管兼排气支管（1"）组成。每个灌浆孔内布置1根进浆支管和1根回浆管兼排气支管，隧洞腰线以上进浆支管伸入孔内10cm，排气支管伸入孔内75cm，腰线以下进浆支管伸入孔内75cm，排气支管伸入孔内10cm，孔口10cm范围用麻丝缠紧管子封堵；每条钢衬段分上、下游两个灌区，每个灌区沿洞轴线方向每排孔布置两组灌浆主管路（每组含1根进浆管和1根回浆管），每套主管路与该排孔支管间隔相连、形成两序孔；上游灌区管路引至上游侧引水隧洞，下游灌区管路引至主厂房水轮基层，灌浆前将灌浆管管口封好，防止污物进入；灌浆采用分序加密原则施工，每次同时灌浆的组数不得超过2组，宜对称分布；排气管回浓浆时扎紧排气管管口，间歇放浆液，达到结束标准时将管口扎死；固结灌浆串浆时，扎紧被串孔管口，间歇放浆液，以防凝结，待所灌孔灌浆结束后先对串浆孔进行灌注。

固结灌浆质量检查采用测定物探孔灌后岩体弹性波波速为主，检查孔压水试验为辅，并结合分析灌浆孔钻孔、检查孔取芯、压水试验和灌浆试验成果等进行综合评定。本工程固结灌浆灌后压水检查合格标准：

85%以上试段的透水率 $q < 1Lu$ ，岩芯获得率 $> 90\%$ ，其余孔段透水率不大于 $1.5Lu$ ，且分布不集中；波速合格标准：测点波速 VP 平均值 $\geq 5000m/s$ ， $VP_{min} \geq 4500m/s$ 。

4.3 回填灌浆

回填灌浆范围为顶拱中心角 120° 内，在回填混凝土备仓时提前预埋灌浆管路，混凝土强度达到70%设计强度后实施；预埋管路由进浆管（1.5"）、回浆管（1.5"）、进浆支管（1"）和回浆管兼排气支管（1"）组成，进浆支管布置在引水隧洞顶拱开挖面 90° 范围布置内，间距2m，预埋支管位置提前造 $\Phi 100mm$ 、20cm深的孔，进浆支管伸入孔内10cm，排气管伸入孔内5cm；沿洞轴线方向每排孔布置一组灌浆主管路（含1根进浆管和1根回浆管），主管路与该排孔支管相连；主管路引至主厂房水轮基层，灌浆前将灌浆管管口封好，防止污物进入；回填灌浆在混凝土强度达到70%设计强度后进行，每条钢衬段作为一个灌注段，每个灌注段按排分二序施工，灌浆前混凝土端面必须封堵严密，两序孔中都应包括顶孔；灌浆时需监测压力钢管的变形，并作好记录；回填灌浆结束以后，关闭孔口闸阀，待凝结束后，才可解除闭浆装置，割除预埋管。

4.4 接触灌浆

钢衬接触灌浆用于钢衬底部混凝土未浇满或混凝土收缩产生的缝隙灌浆，保证回填混凝土与压力钢管之间紧密结合。本工程接触灌浆范围为底部 90° 内，在回填混凝土备仓时提前预埋灌浆管路，二阶段固结灌浆完成60天后实施；灌浆采用集中制浆、分区施灌，每条压力管道钢衬段为一个灌浆分区。每个分区在压力钢管底部布置4排接触灌浆支管（1"），排距1m，上层支管间距3m，底层支管间距1.5m，支管出口焊接喇叭形铁皮出浆盒（直径2.3cm~8cm，长度15cm，壁厚2mm）与压力钢管内壁现场敲击贴紧，用少许麻丝或胶带纸临时封边。上层两排支管及底部两排支管各布置一根主管路与该排孔支管相连后引至主厂房水轮基层，底层管路作为进、回浆管，上层管路作为排气管。

本工程接触灌浆采用循环灌浆法，每个洞段不分序一次灌完，底层孔灌浆时、上层孔排气兼出浆；灌浆前先进行通风，尽可能达到脱空区域干燥、无水，通风排水压力需小于灌浆压力，通风排水时间不小于一小时；灌浆采用PO42.5素水泥浆作为灌注材料，浆液水灰比采用0.8:1、0.5:1两个比级，尽量多灌注较浓浆液，灌浆过程中敲击震动钢衬，灌至最浓一级浆液，待排气孔排出浓浆比重（用比重计测定）与注入相同且吸浆率为零后，持续灌注10min后将其孔口阀门关闭结束灌注，同时记录排出浆量和浓度。接触灌浆压力采用0.1MPa，灌前在钢衬脱空位置安装变形观测装置，安装在钢管脱空位置和钢衬未脱空部位，灌浆作业过程中，使用LHOB型智能位移测控仪对灌浆中的变化情况进行检测与控制，在压力水冲洗及灌浆过程均进行变形观测及记录，发现异常及时调整降低压力。

灌浆结束7d~14d后，用锤击法或无损探测法进行灌浆质量检查。若局部位置出现脱空现象，需做二次补强灌浆。二次补强灌浆孔在钢衬上开孔位置，需经建管局、设计单位、监理单位同意。脱空区要求：同一分区内脱空区数量不能多于3个；单个脱空区面积不超过 $0.3m^2$ 。

5 结束语

压力钢管的常用运输安装方案有三种：方案一是在制造厂制作成单节运至安装间，通过桥机吊运至引水隧洞在厂房上游墙的出洞口，再用平板台车运输至洞内进行安装；方案二将进入引水隧洞下平段的施工支洞扩宽（让压力钢管单节采用平卧的方式运输能够通过），在施工支洞与第一条相交的压力管道外侧扩挖一个压力管道翻转场，同时将联通各条引水隧洞的施工支洞扩高（让压力钢管翻身后能够通过），压力钢管运输至翻转场翻身后再通过联通洞运输至各条引水隧洞进行安装；方案三是每节分2~3个瓦片运至施工支洞与引水隧洞交叉口组对焊接后安装。本工程采用了方案一，优点是简化运输方式，能实现快速安装，不用增加施工支洞扩挖工程量，节约了投资；缺点是从厂房运输钢管对厂房其它施工造成一定干扰。钢衬段的灌浆分为开孔灌浆和埋管灌浆两种方式，由于高强钢压力钢管灌浆孔焊缝易开裂，本工程压力钢管灌浆采用不开孔方案，避免了高强钢开口灌浆后封堵困难且容易开裂的风险；同时严格控制埋管灌浆工艺，确保质量，投运后的厂房上游墙无渗水，说明引水隧洞设计及施工方案合理、工程质量好。

参 考 文 献 :

- [1] 陈子海,陈子河,陈绍英. 预埋灌浆管在毛尔盖水电站压力钢管中的应用[J]. 四川水力发电, 2011, 30(6):143—145.
- [2] 马善定,伍鹤皋,秦继章. 水电站压力管道 [M] . 湖北: 湖北科学技术出版社, 2002. 265—301.
- [3] 胡小龙,张国正,钟红春. 圆形水工隧洞钢衬加固技术 [J] . 人民长江, 2011 (12):56—59.
- [4] 潘龙龙.水利水电灌浆工程质量控制的探讨[J].河南建材, 2019 (05) : 227-229.
- [5] 戴新型.隧洞为水利水电工程引水隧洞施工技术[J].建材与装饰, 2019 (27) : 292-293.
- [6] 罗立荣.水利水电工程灌浆施工技术的应用研究[J].决策探索 (中), 2019 (08) : 37-38.
- [7] 顾冬,吴宇,马力.浅析水利水电工程防渗技术[J].黑龙江水利科技, 2019,47 (07) : 120-121.
- [8] 白玉臣. 浅谈压力钢管工程施工[J]. 工 程 技 术, 2007 (07) : 71.
- [9] 刘科彭,智祥宛良,朋彭鹏. 乌东德水电站Φ13.5 m洞内超大型压力钢管无内支撑施工技术[J]. 水电与新能源, 2019 (09) : 35-39.

作者简介: 朱宝凡(1974.8), 男, 傣族, 云南云县人, 高级工程师, 工学学士, 华能澜沧江水电股份有限公司乌弄龙·里底水电工程建设管理局乌弄龙工程部主任, 主要从事水电工程建设管理工作, 地址: 云南省昆明市五华区红园路国福现代蔷薇苑 1-1006 室, 邮编 650202: 电话: 13608717072, E-mail: 121621299@qq.com。