

# 复杂地质条件下800MPa大型钢岔管洞内安装及水压试验研究

## 800MPa高强度水电用钢单面焊双面成型焊接试验研究

杨联东

(中国水利水电第三工程局有限公司, 陕西省 西安市 710032)

**摘要:** 针对800MPa级高强度水电用钢单面焊双面成型, 分别通过有陶瓷衬垫和无陶瓷衬垫两组焊接试板的试验, 研究了两种方式对焊接性能的影响, 以及通过两组不同厚度焊接试板的焊接工艺评定工作, 从力学性能指标、残余应力等数据论证了单面焊双面成型在水电高强度钢上运用的可行性, 特别是单面焊双面成型工艺对于压力钢管安装现场推广运用后的经济效益巨大, 可以大大减小前期洞室的开挖尺寸, 降低工程造价和缩短工期。针对复杂环境下大型800MPa钢岔管洞内安装施工的需要, 结合洞内运输安装特点, 设计了专用回转运输台车, 解决了大型钢岔管洞内运输难题。在洞内吊装翻身中, 针对危岩结构的地质条件, 在不宜进行大面积扩挖、以及无吊装天锚的前提下, 利用布置的洞内吊架、滑移台车及钢栈桥进行岔管的卸车、拼装、水压试验, 为大型钢岔管运输安装、水压试验提供了新的思路。

**关键词:** 800MPa级高强钢; 单面焊双面成型; 焊接工艺; 应力测试; 力学性能; 化学成分复杂地质条件; 大型钢岔管; 运输; 安装; 水压试验; 溧阳抽水蓄能电站

中图分类号: TG443TV547.2

文献标识码: A

(中国水利水电第三工程局有限公司, 江苏 溧阳 213334)

**摘要:** 针对复杂环境下大型800MPa钢岔管洞内安装施工的需要, 结合洞内运输安装特点, 设计了专用回转运输台车, 解决了大型钢岔管洞内运输难题。在洞内吊装翻身中, 针对危岩结构的地质条件, 在不宜进行大面积扩挖、以及无吊装天锚的前提下, 利用布置的洞内吊架、滑移台车及钢栈桥进行岔管的卸车、拼装、水压试验, 为大型钢岔管运输安装、水压试验提供了新的思路, 工程对大型钢岔管洞内关键施工技术进行了深入的研究。

**关键词:** 复杂地质条件; 大型800MPa; 钢岔管; 运输; 安装; 水压试验; 溧阳抽水蓄能电站

## 0 序言引言

抽水蓄能电站压力钢管制作安装施工中, 目前主要有Q345、600MPa级、800MPa级三种规格材质的钢材, 单面焊双面成型工艺在水电站虽然有一定运用, 但是基本上在Q345、600MPa级别钢材上, 针对800MPa级高强钢, 目前国内水电研究不多, 随着水电行业快速发展, 800MPa级高强钢运用较为普遍, 因此, 研究在一定条件下, 水电站800MPa级高强钢单面焊双面成型技术, 特别是针对压力钢管安装, 推广后运用后, 可以大大减小前期洞室的开挖尺寸, 降低工程造价和缩短工期确有很大的经济价值和工程实际意义。

江苏溧阳抽水蓄能电站地处位于江苏省溧阳市, 上水库位于龙潭林场伍员山王区, 与安徽省接壤; 下水库位于天目湖镇吴村, 与沙河水库为邻。枢纽建筑物主要由上水库、输水系统、发电厂房(含地面开关站及副厂房)及下水库等4部分组成。电站安装6台单机容量250MW的可逆式水泵水轮发电机组, 总装机容量1500MW, 输水系统布置在上水库左侧, 引水和尾水均采用“一洞三机”供水方式, 水库正常蓄水位19.00m, 死水位0.00m, 调节库容1195万m<sup>3</sup>, 库口面积0.706km<sup>2</sup>。

引水系统岔管为采用日本800MPa级高强钢岔管, 该岔管目前为国内在建体型最大的抽水蓄能电站钢岔管, 也是国内首个800MPa级高强钢在洞内进行拼装焊接、水压试验的800MPa级高强钢岔管。钢岔管运输安

装面临众多施工技术难题，加之由于溧阳抽水蓄能电站的地下厂房及引水系统工程地质条件非常差，断层多、岩脉分布广，并且洞内多处为IV、V类围岩，因此钢岔管的运输安装面临众多施工技术难题国内罕见，更加增加了现场施工难度。在复杂地质条件下，洞内无法扩挖、天锚全部取消，因此，研究复杂地质条件下岔管运输安装施工工艺和方法，可以有效减小危岩结构的扩挖，保证工程整体工期不受影响，确保施工安全具有很大现实意义。<sup>[1]</sup>

## 1 工程概况

### 1.1.4.1 大岔管主要技术参数工程概况

河北丰宁抽水蓄能电站位于河北省丰宁满族自治县境内，工程区距丰宁县约 62km，电站对外有国道、省道和简易乡村道路相通。工程规划装机容量 3600MW，为一等工程，大（1）型规模。分两期建设，本期装机容量 1800MW，安装 6 台单机容量为 300MW 的可逆式水泵水轮机组。电站主要由上水库、水道系统、地下厂房系统、蓄能专用下水库及拦沙库等建筑物组成。电站建成后，在京津唐电网系统中承担调峰、调频、调相和事故备用任务。

压力钢管母材分别为：500MPa 级、600MPa 级、800MPa 级。钢管母材最小厚度 18mm，最大厚度为 62mm（800MPa 级）。后续二期也在建设中，一期、二期合计压力钢管制造安装工程量约 4.4 万吨。研究单面焊双面成型技术将是钢管安装工程需要突破的技术难题。

## 2 陶瓷衬垫对焊缝化学成分及力学性能的影响

### 2.1 陶瓷衬垫对焊缝化学成分的影响

不添加垫片和添加陶瓷垫片的正面焊缝化学成分（A3-1、B3-1）大致稳定一致；但两者的背面焊缝成分（A3-2、B3-2）中，添加陶瓷垫片后的背面焊缝成分的 C 含量有少许提高，Si 含量提高了约 0.1，其他元素成分大致稳定在同一水平，见下表 1。

大岔管基本锥由日方 C6 标

在日本制造、预拼装验收合格后，分解成瓦片供货到施工现场，由本标段负责洞内瓦片组装、焊接、水压试验等工作，岔管主要外形及月牙肋尺寸见下图 1。

大岔管安装

参数：为

1、主管直径 7m；2、支管直径 5.7m；3、分岔角 70°；4、钢板

厚度 56mm~60mm、材质 SUMITEN780Z，钢材级别 800MPa；

5、月牙肋厚度 120mm；6、公切球直径：为 8050mm；裤衩开口处的

7、岔管外形尺寸为（长×宽×高）：12170mm×8050mm×13334mm（长×宽×高）裤衩开口）。

—图 1—岔管主要外形尺寸示意（单位：mm）

收稿日期：2019 年 4 月 22 日

基金项目：大 HD800MPa 级钢岔管洞内原位组装及水压试验工艺研究（合同编号：2012-04）。

作者简介：杨联东（1969-），男，陕西安康，项目总工，主要从事金属结构及机电安装工作。E-mail: yanglian\_dong@163.com

图 1—岔管主要外形尺寸示意图

图1 岔管主要外形尺寸示意（单位：mm）

## 4.2 岔管洞内安装施工难点

——溧阳抽水蓄能电站引水系统整体开挖时，面临围岩结构差（多为IV类、V类岩层）、岩脉多等不利的复杂地质条件，给大型岔管运输、吊装及洞内拼装带来很大难度，具体难点如下：

### 1.2.1 (1) 运输难点难点。

由于地质条件因素，在进厂交通洞、2#号施工支洞与10#号施工支洞形成“Z”字型形交叉口，从而造成交通车辆转弯过急，给钢管运输带来不便，常规运输方法无法实现，另外此处由于围岩较差，大面积扩挖，将面临安全风险，工期也大受影响。

### (2) 1.2.2 洞内卸车吊装难点难点。

原定在大岔部位卸车翻身吊装，由于洞内基岩多为IV、V类围岩，且为断层及岩脉区，洞内不宜大面积开挖，大岔部位有效空间有限，因此造成岔管投标方案中翻身天锚取消，增加了岔管在洞内翻身的难度，在岔管第一次设计联络会上，日方C6标提供的吊装方案中，顶部需要大面积的扩挖，高度约4米m，技术上有相当难度，直线工期占用近三个月3个月，成本加大，因此，如何优化吊装方案，成为工程施工的另一个重点和难点。

### 1.2.3 (3) 水压试验难点。

如此大型钢岔管在洞内做水压试验，将面临充排水、试验布置、闷头运输吊装等一系列难题，其中水压试验大闷头重达44t，洞内拼装翻身吊装难度很大。<sup>421</sup>

在复杂地质条件下，洞内无法扩挖以及天锚全部取消，因此，研究复杂地质条件下岔管运输安装施工工艺和方法，可以有效减小危岩结构的扩挖，保证工程整体工期不受影响，确保施工安全具有很大现实意义。

## 2 施工关键技术

### —优化的运输安装方案简介

为了克服以上运输和吊装翻身难题，我们进行了工艺创新设计，在运输中，设计了岔管运输专用回转台车、液压顶升油缸系统，成功解决了运输通道狭小、运输拖车无法直接运输到位的难题；在大岔拼装部位，架空布置钢栈桥的方法，并利用洞内安装吊架进行现场吊装翻身等工序，在大岔拼装施工中，采用局部整体拼装、水平滑移的新工艺，解决了洞内狭小空间的起吊手段的难题，施工安全可靠。

## 3 施工关键技术

### 3.2.1 大岔管洞内运输关键技术

大岔管节及瓦片运输采用两种2种方式结合，1、；①如果大岔管节及瓦片尺寸满足洞内运输需要，可以直接采用拖板车进行运输，在大岔安装部位进行卸车。2、；②如果大岔瓦片不能直接运输到位，则可以采用专用回转台车进行运输，具体尺寸介绍如下。—

3.1.1 专用运输回转台车的设计  
3.1.2 台车设计原则及考虑因素

表 1 熔敷金属化学成分

焊接材料	背面处理方式	焊缝位置	编号	Wt/%							
				C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
XY-J80SD	不加垫片	正面	A3-1	0.0532	0.238	1.42	0.0064	0.0038	0.345	0.318	2.92
	添加垫片	正面	B3-1	0.0505	0.225	1.43	0.0062	0.0038	0.353	0.316	2.94
	不加垫片	背面	A3-2	0.0569	0.193	1.35	0.0069	0.0029	0.365	0.332	2.99
	添加垫片	背面	B3-2	0.0583	0.313	1.36	0.0075	0.0038	0.355	0.323	3.03

2.2 陶瓷衬垫对焊缝力学性能的影响

焊后对试板进行后热 (200℃×1hrs)，背面未添加陶瓷垫片和添加陶瓷垫片后的焊缝金属力学性能试验结果见表 2。

表 2 焊缝金属力学性能试验结果

焊接材料	背面处理方式	焊后状态	屈服强度 Rp0.2 (MPa)	抗拉强度 Rm (MPa)	伸长率 A (%)	V 型缺口-40℃冲击功 KV2 (J)	X 射线探伤
XY-J80SD	要求		≥690	≥780	≥15	≥47	I 级
	未加垫片	200℃×1h	689	797	17.5	77、76、87、82、81	I 级
	加垫片	200℃×1h	693	782	19.5	72、66、72、72、86	I 级

结论：从焊缝正反面的化学成分数据、焊缝不同位置的硬度分布、以及焊缝金属的力学性能上，可看出添加陶瓷垫片后的背面焊缝的 C、Si 含量有少量增高，但整个焊缝的硬度均满足要求；焊缝金属力学性能数据表明：背面添加陶瓷垫片后导致比未加垫片的焊缝金属的抗拉强度没有明显差异，增加垫片的焊缝金属延伸率更优，冲击韧性均在同一水平，数据稳定离散度小。射线探伤均为 I 级。试验结果表明，采用陶瓷垫片进行单面焊双面成型技术不会对焊缝性能产生明显影响。

3 焊接工艺评定试验分析

为了更进一步深入研究单面焊双面成型技术在水电高强钢的运用，我们于 2017 年 8 月，进行了两组焊接工艺试板的焊接，试板材料选用舞阳钢铁有限公司生产的 800MPa 高强钢 (WSD690E)，其尺寸分别为 600mm×400mm×36mm、500mm×400mm×46mm，按照规范要求，可以覆盖 25mm-69mm 的钢板。采用 50° V 形坡口；采用 CHE807RH (φ 3.2 打底、φ 5.0 填充，φ 4.0 盖面)，加热方式：远红外线电加热，层间温度：102℃-170℃。焊接方法：采用焊条电弧立焊。

表 3 焊接工艺参数

试板名称	实验工艺参数							
	焊接层数	规格 (mm)	电流 (A)	电压 (V)	焊接速度 (mm/min)	预热温度 (°C)	层间温度 (°C)	后热温度 (°C)
KY2	1	φ3.2	113	22	8~9	100~110	100~155	170~196
	2~9	φ5.0	176	24	6~7			
	10~11	φ4.0	156	26	7~8			
	1	φ3.2	113	22	8~9			

专用运输回转台车的设计需要遵循以下原则：具备足够的强度、刚度和稳定性；方便现场吊装施工，便于拆装（需考虑尺寸、重量等因素）；充分考虑现场运输、拼装焊接及安装的需要。

图2-台车结构简图

### 3.1.3台车结构简介

根据以上原则此原则设计了运输专用回转台车，具体尺寸见下图2。为满足洞内运输，需要定制专用回转台车，HJ800型移动回转运输台车（以下简称“台车”）主要包括主梁、万向轮装置、回转梁、回转机构、工作台面、回转支撑调整梁、锁紧装置、锁紧丝杠、钢岔管锁紧支座、橡皮垫、调整座板、调整倒链、顶升千斤顶、连接梁等组成。

### 3.1 参与应力试验分析

单面焊双面成型工艺在厚板焊接过程中，由于焊接热输入在焊缝一侧会产生一定的焊接变形，存在一定的残余应力，为了解焊接试板在焊接中的残余应力大小，以便确定更加合理的焊工工艺，我们对两块焊接试进行了硬约束，即采用强制外力对焊接试进行定位，焊接完成后，进行残余应力测试。残余应力测试采用 YC-III X 型应力测试仪，应变计型号为：TJ120-1.5- $\phi$ 1.5。委托测试单位：电力工业金属结构设备质量检测中心。

残余应力测点在焊缝及热影响区各布置4点，具体测点布置见下图1，参与应力测试过程见图4、图5、图6、图7，残余应力结果见下表4。

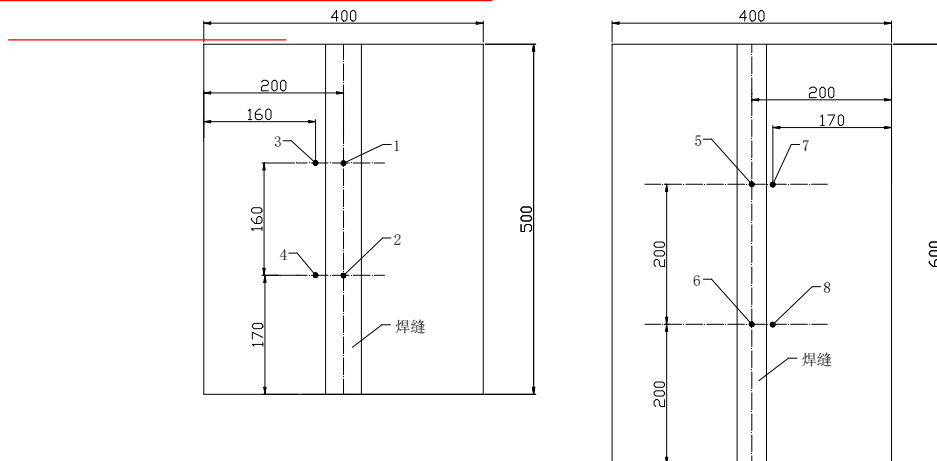


图1 残余应力测点布置简图

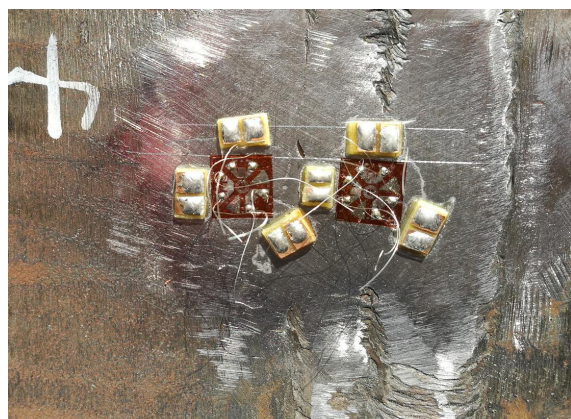


图 2 焊接强制约束状态

图 3 应变片安装



图 4 钻孔装置安装

图 5 测试记录中

表 4 残余应力测试表

试板名称、测点位置、编号			应变值 ( $\mu\epsilon$ )			应力值 (MPa)		
试板名称	编号	测点位置	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\theta$
KY2	1	1#测点 (焊缝)	-267	36	252	143	-128	5
	2	2#测点 (焊缝)	-375	-113	247	226	-97	-4
	3	3#测点 (热影响区)	172	110	-78	25	-119	13
	4	4#测点 (热影响区)	36	29	-57	42	-21	-20
KY3	5	5#测点 (焊缝)	-462	-98	-15	375	104	16
	6	6#测点 (焊缝)	-132	-182	82	123	-72	-28
	7	7#测点 (热影响区)	-35	-15	-137	131	42	-27
	8	8#测点 (热影响区)	-183	-280	-123	221	87	-38

说明： $\epsilon_1$ ：平行焊缝方向的应变， $\epsilon_2$ ：与焊缝  $45^\circ$  方向的应变， $\epsilon_3$ ：垂直焊缝方向的应变， $\sigma_1$ ：最大主应力， $\sigma_2$ ：最小主应力， $\theta$ ： $\sigma_1$  与  $\sigma_2$  的夹角，单位“°”。

结论：KY2 试板残余应力最大值 226MPa，位于 2#测点（焊缝）位置，相当于试板 WSD690E 最小屈服极限 690MPa 的 32.8%，KY3 试板残余应力最大值 375MPa，位于 5#测点（焊缝）位置，相当于试板 WSD690E 最小屈服极限 690MPa 的 54.3%。

### 3.2 力学性能试验数据分析

力学实验结果见下表 5。

表 5 焊缝金属力学性能试验结果

焊接材料	背面处理方式	焊后状态	弯曲	抗拉强度 Rm(MPa)	V 型缺口-40℃ 冲击功 (KV2(J))	硬度值
CHE		要求	不大于 3mm	≥770	≥47	≤350
807RH	KY2	200℃×1h	无裂纹	781、804、779、 795	71、75、75、 97、77、86	最大 265
	KY3	200℃×1h	无裂纹	799、785、786、 793	72、72、85、 241、201、235	最大 260

根据表中数据分析，拉伸强度均大于 770MPa，满足设计要求；冲击试验中，冲击功最大 241J，最小也有 71J；弯曲试验全部合格；硬度最大 265，小于 350；通过以上数据分析，两组焊接试板力学试验结果全部满足规范要求，单面焊双面成型的焊缝金属力学性能是可以保证的。

### 3.3 化学成分分析研究

项目对两组焊接工艺试板的焊缝熔敷金属进行了化学成分分析实验，检测结果见下表 4.6-1.根据实验报告结果显示，化学成分均在规范要求范围内，特别是 P、S 含量控制较好，有利于焊缝质量的提高和稳定。

表 6 焊接试板焊缝熔敷金属化学成分

焊接、材料	编号	板厚	Wt/%							
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
CHE	KY2	36mm	0.0638	0.1636	1.4092	0.0048	0.0063	0.0906	0.6356	2.6658
807RH	KY2	46mm	0.0665	0.1700	1.3762	0.0047	0.0059	0.1079	0.6387	2.5322

### 3.4 金相组织实验研究

通过金相组织研究，可以从微观上了解焊接工艺、焊接方法以及焊接材料与母材的匹配等关键环节，对于提高改进后续工艺提高理论依据和数据支持，本研究采用金属显微组织检验方法符合 GB/T13298-2005 的规定，实验设备：LeicaDM2700M 型金相显微镜，实验中采用 4%硝酸酒精溶液侵蚀 10 秒。

典型断面组织：

- 1、WSD690E 高强度母材金相组织为：回火索氏体；
- 2、热影响区 1 近焊缝处金相组织为：粒状贝氏体+无碳贝氏体+少量条、块状铁素体；
- 3、焊缝内部金相组织为：沿柱状晶分布的铁素体+无碳贝氏体，晶内为针、块状铁素体+珠光体；
- 4、热影响区 2 近母材金相组织为：针、块状铁素体+珠光体。

根据上述组织分析，焊缝区域组织较好，热影响区多为粒状贝氏体和铁素体及珠光体，整体组织保持了良好的强度和韧性。

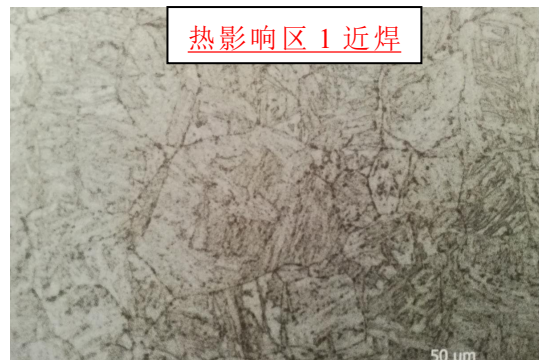
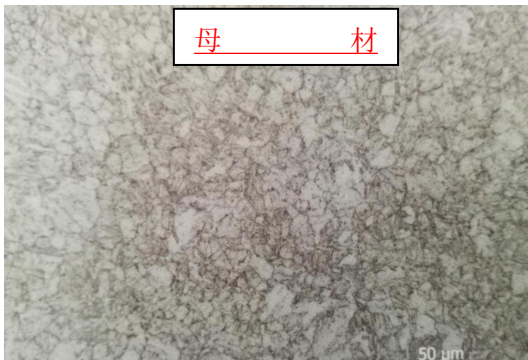


图 8 典型断面金相组织简图

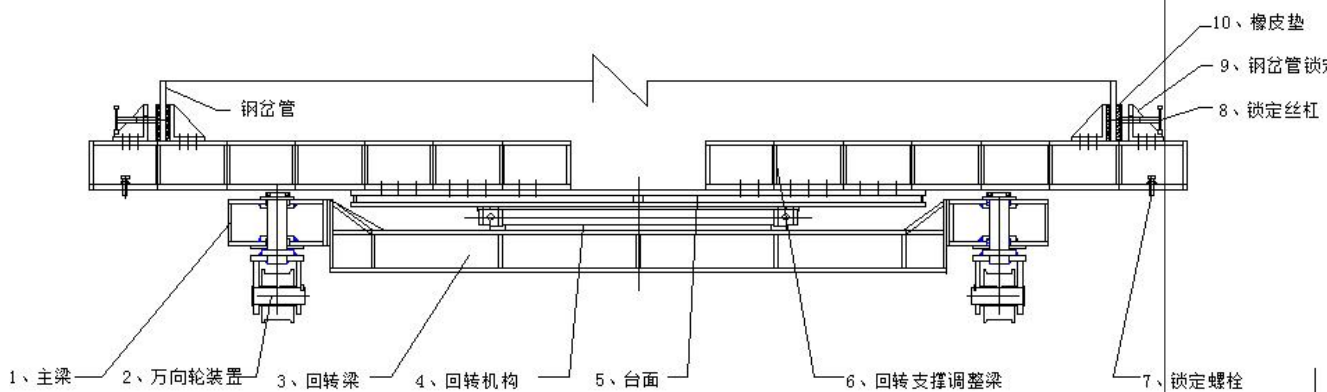


图 2 回转台车结构示意图

台车按照最大载重680t设计。由于该台车为特制运输车，具有行走和承载平台回转功能，为确保小岔管运输时的安全可靠，在设备出厂正式使用前，需要在钢管厂内进行70%、100%、125%负荷试验。

### 3.1.4 洞内回转台车运输

在洞内利用回转台车运输时，根据洞内转弯尺寸及时调整台车回转机构，带动岔管管节旋转一定角度，以适应洞壁尺寸需要，在遇到90度左右直角弯时，可将台车整体顶升，旋转台车底部万向轮，达到交口处换轨道的目的。

本台车的成功运用，缩小了前期工程洞内开挖断面的尺寸，减小了开挖支护成本和工期，在后期钢岔管安装施工中，解决了大型钢岔管洞内运输难题。

## 3.2 大岔管洞内卸车、翻身、吊装拼装关键技术

大岔管由运输状态变为安装状态，需要在洞内进行卸车、翻身、吊装。在大岔管拼装部位，采用在洞内架空布置钢栈桥和拼装吊架进行现场施工。

### 3.2.1 大岔管洞内拼装施工总体介绍

大岔安装总体布置见下图3，以2#引水系统为例，在小岔安装回填完成后，总体思路及安排如下：

1、与小岔连接部分：先将大小岔连接段运输到位临时存放，其中管节（②YL9、②YL8、②YL7、②YL6）四节与小岔拼装并焊接，剩余管节（②YL5、②YL4、②YL3、②YL2、②YL1）以瓦片形式在安装管节内外临时存放，②YL1分两部分制造，②YL1-1为成品管节，②YL1-2作为凑合节瓦片制造。

2、与4#引水支管连接段：先将④YZ6、④YZ5以瓦片形式作为凑合节临时存放在已经安装的钢管内外，再将④YZ4、④YZ3、④YZ2、④YZ1运输到位，在4#引水支管内临时存放，给后续大岔拼装及水压试验让出空间。

图3 大岔安装总体管节说明简图

### 3.2.2 拼装施工运输钢栈桥设计

岔管运输到大岔部位，需要进行卸车、翻身、吊装，由运输状态变为安装状态，钢栈桥具体尺寸和位置见图4，岔管利用60t回转台车进行运输，在大岔部位进行翻身，钢栈桥轨道采用43轨，轨距4.4m，上游与10#号施工支洞进行连接，下游沿两条支管安装方向交叉铺设3m轨距的轨道，在交叉处轨道设计成活动轨，为了保证后期大岔拼装精度，所有轨道铺设要求水平度不大于 $\leq 2\text{mm}$ ，轨距误差3mm，相应轨道滑移台车设计成轨距3m。



图3 岔管卸车翻身钢栈桥及吊架平面

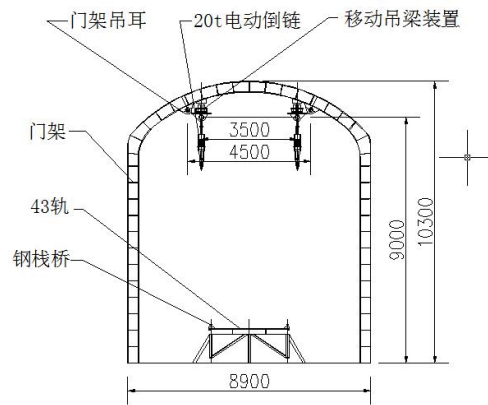
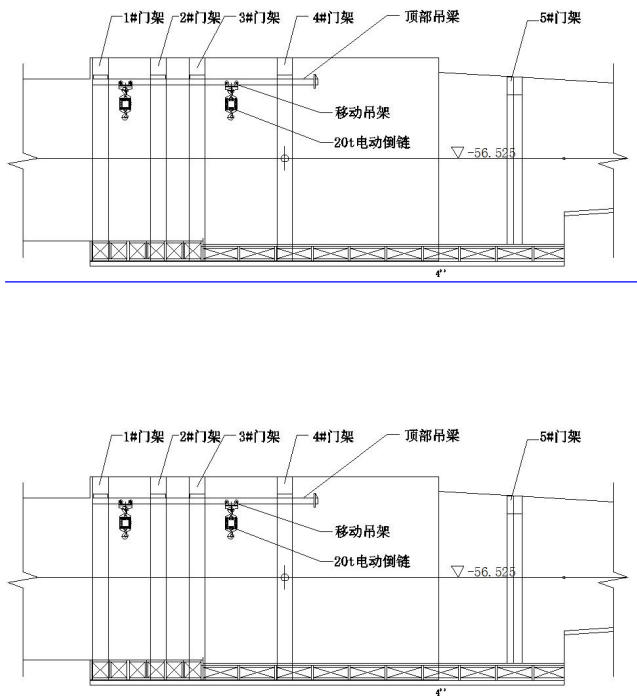
### 3.2.3 卸车翻身及拼装吊架设计

由于大岔部位围岩较差，多为IV、V类围岩，天锚取消后，

现场设计了一组吊架，见下图54、图65，具体吊装设备配置如下：为利用1#号、2#、3#、4#四个号龙门架，中间顶部布置两道横梁，横梁间距3.5m，通过连接板分别与各吊架进行连接，横梁上布置四台滑移小车，上面安装四台20t电动倒链，滑移小车通过卷扬牵引可在横梁轨道上水平移动，用于进行卸车和翻身工作和吊装作业。

图5 钢栈桥及吊架立面图

图6 钢栈桥上游立视图



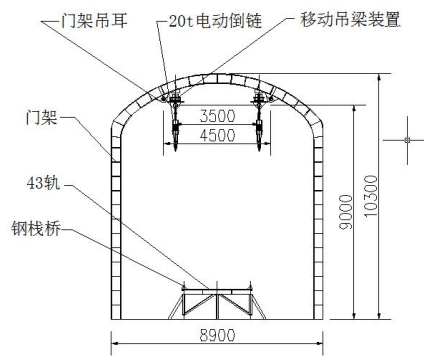


图4 钢栈桥及吊架立面示意

图5 钢栈桥上游立视示意

### 32.3 大岔管洞内现场拼装流程技术

在大岔拼装施工中，采用局部整体拼装、水平滑移的新工艺，解决了洞内狭小空间的起吊手段的难题，施工安全可靠。以2号引水系统为例，在小岔管安装回填完成后对大岔管进行洞内安装。大岔管洞内安装总体布置见图6。

#### 施工顺序为

(1) 与小岔管连接部分。先将大、小岔管连接段运输到位临时存放，其中管节 (②YL9、②YL8、②YL7、②YL6) 4节与小岔管拼装并焊接，剩余管节 (②YL5、②YL4、②YL3、②YL2、②YL1) 以瓦片形式在安装管节内外临时存放，②YL1分2部分制造，②YL1-1为成品管节，②YL1-2作为凑合节瓦片制造。

(2) 与4号引水支管连接段。先将④YZ6、④YZ5以瓦片形式作为凑合节临时存放在已经安装的钢管内外，再将④YZ4、④YZ3、④YZ2、④YZ1运输到位，在4号引水支管内临时存放，给后续大岔管拼装及水压试验让出空间。

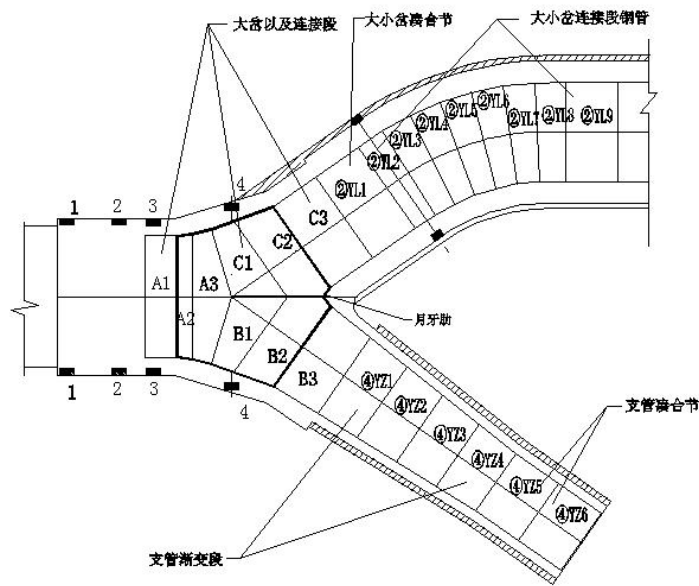
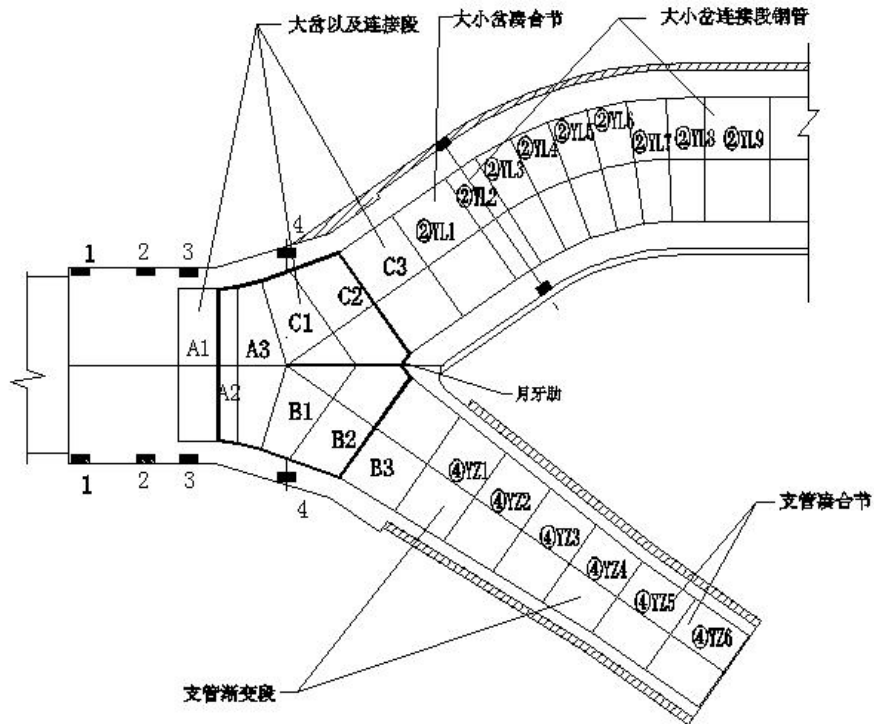


图6—大岔管安装总体管节布置示意

(1) 与小岔管连接部分。先将大、小岔管连接段运输到位临时存放，其中管节（②YL9、②YL8、②YL7、②YL6）4节与小岔管拼装并焊接，剩余管节（②YL5、②YL4、②YL3、②YL2、②YL1）以瓦片形式在安装管节内外临时存放，②YL1分2部分制造，②YL1-1为成品管节，②YL1-2作为湊合节瓦片制造。

(2) 与4号引水支管连接段。先将④YZ6、④YZ5以瓦片形式作为湊合节临时存放在已经安装的钢管内外，再将④YZ4、④YZ3、④YZ2、④YZ1运输到位，在4号引水支管内临时存放，给后续大岔管拼装及水压试验让出空间。

大岔管拼装工艺流程见下图7，拼装按照“闷头和工艺锥（BH2+T3+T1）→闷头和工艺锥（BH3+T4+T2）→大岔（C1+C2+C3）→大岔（B1+B2+B3）→大岔月牙肋（R）→大岔（A3+A2+A1）→大岔总拼装检查”的工序依次进行。具体为见图7。

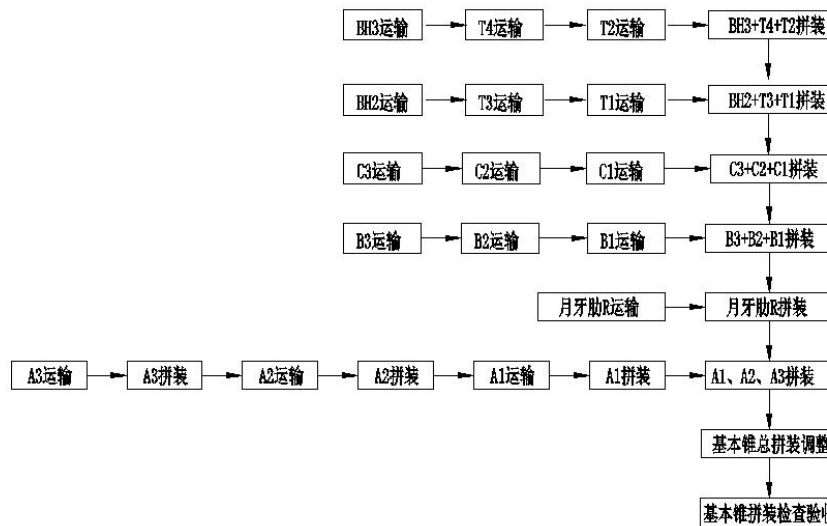


图7—大岔管拼装工艺流程

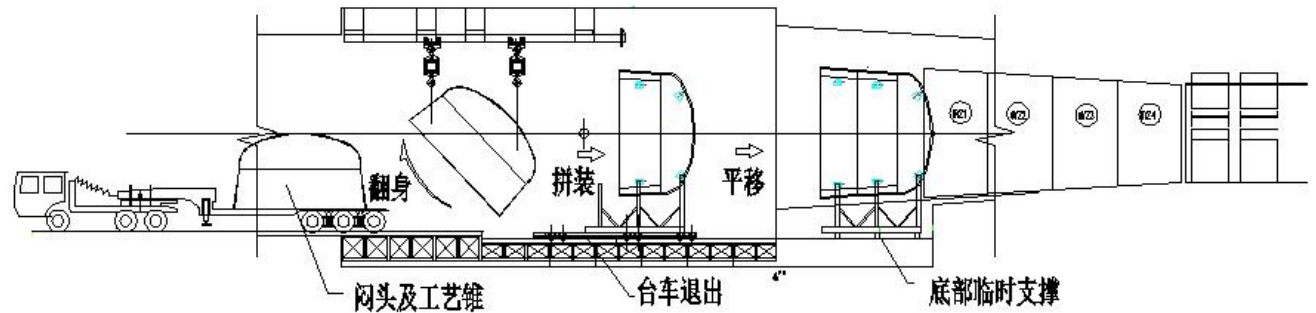
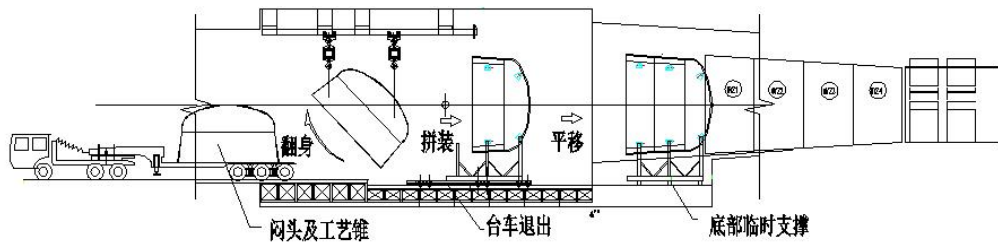
### 3.4 大岔洞内现场拼装关键部位说明

#### 3.4.1 (1) 闷头和工艺锥 (BH2+T3+T1、BH3+T4+T2) 拼装。

由于水压试验的需要，提前将闷头和工艺锥运输到大岔部位进行预存，由于直径5.7m，BH2+T3可以整体运输进洞，T1整体运输进洞，运输采用拖车，在大岔部位卸车后，依次在专用台车上安装固定，水平牵引滑移到下游预存空间处，具体卸车、翻身吊装见下图8。

(2) 大岔本体管节 (B1+B2+B3、C1+C2+C3) 拼装。大岔本体管节拼装与闷头和工艺锥拼装相同，先整体运输B3，大岔部位翻身后，在专用台车上安装固定，运输B2，翻身后与在台车上与B3进行组装组对，由于大岔空间限制，B1无法整体拼装，需要瓦片运输、翻身，与B2在台车上进行拼装组对，整体尺寸检查后，向下游整体水平滑移，给后续拼装预留空间。

(3) 大岔月牙肋 (R) 拼装。由于月牙内形状特点，重心位置原因，在洞内吊装、翻身及拼装有一定难度，用拖车直接运输到位，利用4台移动小车，上面布置20t电动倒链进行卸车翻身，根据月牙内结构特点，在不同部位焊接吊耳，进行现场吊装，将月牙内调整为安装状态后，将已拼装的大岔本体管节向上游整体滑移，进行现场拼装。



— 闷头和工艺锥（BH3+T4+T2）拼装方法相同。—

图8 闷头和工艺锥（BH2+T3+T1）拼装示意图

==

#### 3.4.2 (2) 大岔本体管节（B1+B2+B3、C1+C2+C3）拼装。

大岔本体管节（B1+B2+B3）拼装，与闷头和工艺锥拼装相同，先整体运输B3，大岔部位翻身，在专用台车上安装固定，运输B2，翻身与在台车上与B3进行组装拼对，由于大岔空间限制，B1无法整体拼装，需要瓦片运输、翻身，与B2在台车上进行拼装组对，整体尺寸检查后，向下游整体水平滑移，给后续拼装预留空间。

大岔本体管节（C1+C2+C3）拼装，与大岔本体管节（B1+B2+B3）拼装顺序相同。

#### 3.4. (3) 大岔月牙肋（R）拼装。

由于月牙内形状特点，重心位置原因，在洞内吊装、翻身及拼装有一定难度，用拖车直接运输到位，利用四台移动小车，上面布置20t电动倒链进行卸车翻身，根据月牙内结构特点，在不同部位焊接吊耳，进行现场吊装，将月牙内调整为安装状态后，将已拼装的大岔本体管节（B1+B2+B3）、大岔本体管节（C1+C2+C3）拼装向上游整体滑移，进行现场拼装。

#### 3.4.4 (4) 大岔（A3+A2+A1）拼装。

大岔（A3+A2+A1）的拼装，由于A3、A2尺寸较大，瓦片进洞在卸车部位进行拼装成整体管节，翻身吊装后与大岔本体进行大拼，A1尺寸相对较小，可以直接运输到卸车部位，翻身吊装后与本体大拼，翻身吊装工艺与上述方法相同。

#### 3.4.5 (5) 大岔BH1闷头的拼装。

——在大岔洞内水压试验前，需要安装闷头，大岔上游侧闷头BH1，由于重量达到44t，运输安装均存在很大风险，经过仔细研究，最终确定瓦片进洞洞内组装焊接成整体后翻身吊装，与本体连接的方案。

### 3.5 (6) 大岔总体拼装尺寸检查。

——大岔拼装完成后，进行调整水平，确保三个管口水平误差在5mm，然后进行整体尺寸检查，检查内容包括长度尺寸、管口直径误差、圆度误差、错边量及坡口角度、管口间隙等。

### 3.6 (7) 大岔焊接。

——大岔焊接按照先纵缝再环缝顺序的顺序进行焊接，焊接中应注意监控线能量、预热及焊接过程温度、后热等工艺，特别是焊条领用和烘焙均需要需要专人进行管理。

## 4.3 大岔水压试验

### 4.1 大岔洞内水压试验流程

大岔安装完成后需进行大岔洞内水压试验，其流程见下图9。洞内水压试验前应考虑的因素有①洞内位置狭小，施工通道及施工安全必须考虑；②水压试验地基承载力必须提前考虑；③水压试验用水量，充排水方案需要提前考虑，特别是充水水源要清洁和充足，排水要考虑，提前准备水泵和措施，防止造成厂房和尾水的淹没；④提前做好安全预案，沿途指示灯、警戒线、备用抽水泵、撤离路线等，在水压试验前需进行预演。<sup>[3]</sup>

图9 大岔洞内水压试验流程图

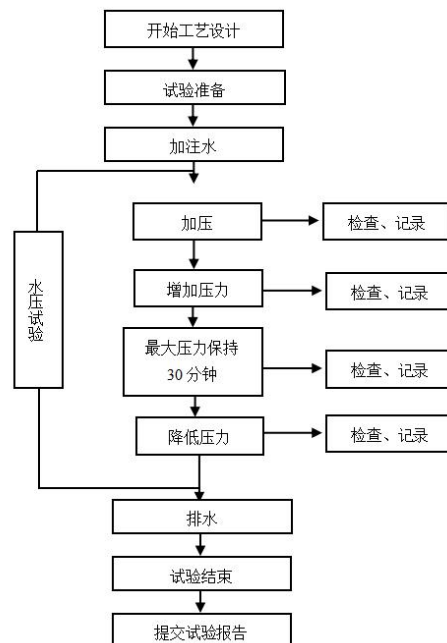


图9—大岔洞内水压试验流程示意

#### 4.2 洞内水压试验必须考虑的因素

——1、洞内位置狭小，施工通道及安全必须考虑；2、水压试验地基承载力必须提前考虑；3、水压试验用水量，充排水方案需要提前考虑，特别是充水水源要清洁和足够，排水要考虑，洞内其他部位施工的安全，提前准备水泵和措施，防止造成厂房和尾水的淹没；4、提前做好安全预案，沿途指示灯、警戒线、备用抽水泵、撤离路线等，在水压试验前预演。

#### 4.3 大岔洞内水压试验前地基处理

由于大岔水压试验钢岔管及闷头重量质量约318t，加上内部支撑等重量质量约360t，加上，岔管内充水约840m<sup>3</sup>，重约840t，总重总质量约1200t，为保证试验顺利进行，地基承载力必须足够，由于大岔部位均为IV、V4、5类围岩，地基较松软，需要在试验前，需要在岔管底部浇筑C25砼，具体浇筑部位见下图10。

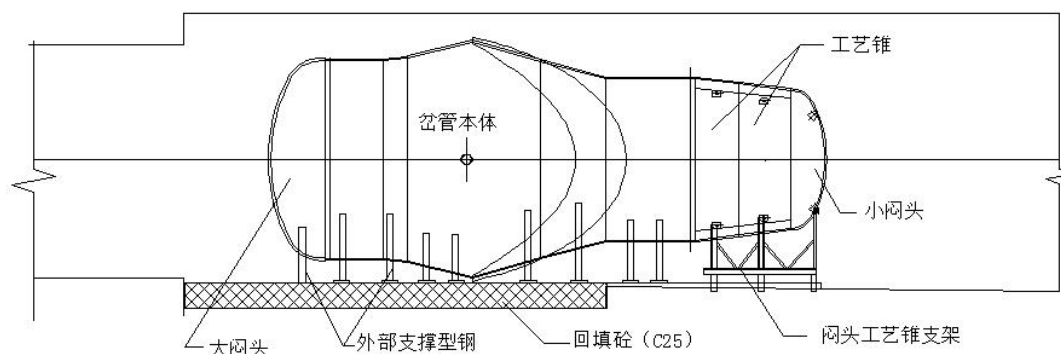


图10—大岔水压试验基础砼混凝土浇筑简图示意

2号引水系统3号钢岔管于2014年12月19日完成洞内水压试验，共进行了2个循环，每次最高试验压力为3.9MPa，试验压力按照0~1、1~2、2~3、3~3.9MPa分阶段进行，升压速率0.05MPa/min，保压时间30min，卸压速率0.05MPa/min，试验过程中进行了应力测试和声发射监控，同时对钢岔管的变形进行了测试。水压试验的结果确认钢岔管均无漏水，声发射监控未发现异常声音，测量应力与计算应力基本一致，全部检测成果符合设计和规范要求。

## 54 大岔管整体顶升调整工艺

——大岔管在水压试验完成后，由于比设计高程低约0.5m左右，因此需要整体顶升到位，整体顶升重达质量达顶升350t，故顶升方案必须确保万无一失。我们采用在岔管外壁利用外支撑架，安装专用顶升装置进行顶升，在主岔口布置两组，四个100t千斤顶，在两小岔口分别布置两组，共计8个50t千斤顶，合计12个点同时进行同步顶升作业，在顶升时由专人负责指挥，边顶升边支垫，每个循环顶升50mm，顶升完成后，进行测量和检查，最后进行精调和细调，进行岔管各部位尺寸检测，满足设计位置尺寸后，进行型钢支撑加固，完成岔管的安装施工。<sup>[44]</sup>

## 65 岔管运输安装优化方案技术经济比较

按照抽水蓄能电站常规设计理念，交通洞及施工支洞、主洞的尺寸均依据最大运输安装单元尺寸进行设计，如果按照大岔在洞外水压试验后运输进洞的方案，洞内挖开控和支护尺寸将比现在大许多，由于洞内地质条件很差，施工工期和施工安全均无法保证，最后优化后的方案，确定为在洞内拼装焊接、洞内做水压试验，洞径仅按照小岔整体运输进洞的尺寸考虑，开挖回位支护工程量大大减小，仅进场交通洞一项节省资金约6000万元，在此基础上，后期又经过方案优化，采用现在的运输安装方案，又节省资金约200多万，经济效益显著。

而且优化后方案取消了运输支洞口的扩挖、大岔顶部吊装位置的扩挖，取消两项扩挖节省直线工期约3个月，另外，避免了在交叉口、大岔等危岩部位的扩挖，减小了施工安全隐患，为整个引水系统安全安全施工创造了条件，避免了与土建的施工干扰，取得了技术、经济、质量、安全的综合最优的效益。<sup>[45]</sup>

## 76 结语

1、本试验选取的钢板厚度分别为36mm、46mm两种水电最典型和常用的厚度，基本上可以覆盖90%以上的蓄能电站压力钢管焊接施工范围，具有很大的代表性，因此，试验结果可以为常规电站压力钢管提供焊接参考。

2、背面添加陶瓷垫片后导致比未加垫片的焊缝金属的抗拉强度没有明显差异，增加垫片的焊缝金属延伸率更优，冲击韧性均在同一水平，数据稳定离散度小，射线探伤均为Ⅰ级。试验结果表明，

采用陶瓷垫片进行单面焊双面成型技术不会对焊缝性能产生明显影响。

3、通过焊接工艺评定以及相关报告结果显示，各项检测结果全部合格，高强钢压力钢管运用单面焊双面成型技术是可靠的，质量是满足规范和设计要求的，从技术上提供了理论支撑，后期还将继续在钢管生产中进行验证实验。

4、通过两组焊接试板的实验研究，最终的残余应力测试报告结果显示，覆盖板厚在 20mm-69mm 的焊接试板，最大残余应力 375MPa，仅为 WSD690 最小屈服极限的 54.3%，说明焊接工艺和焊接材料的选择是合适的。

如果现场压力钢管焊缝形式能够采用单面焊双面成型技术，将极大减小洞室开挖尺寸，进而减小土建开挖量和回填方量，大大降低工程造价和缩短工期，并且可以避免压力钢管外侧的焊缝清根和焊接工程量，提高功效、降低工人劳动强度、有利于现场安全文明施工。

在我国目前大力发展清洁能源以及节能减排的新形势和背景下，单面焊双面成型工艺在水电站的研究及运用，可以有效减小能源消耗，降低施工成本，经济效益和社会效益显著，对于行业技术进步有着一定的积极意义，特别是目前正在发展高峰期的蓄能电站压力钢管施工具有很大的借鉴意义。溧阳抽水蓄能电站面临地质条件差、工期紧、岔管施工困难等诸多不利因素，针对复杂环境下大型 800MPa 钢岔管洞内安装施工的需要，结合洞内运输安装特点，设计了专用回转运输台车，解决了大型钢岔管洞内运输难题，并合理的利用布置的洞内吊架、滑移台车及钢栈桥对钢岔管进行的卸车、拼装及水压试验。2014 年 7 月，3#大岔管拼装完成，2014 年 11 月洞内焊接完成，2014 年 12 月 19 日完成后洞内水压试验，1#大岔在 2015 年 5 月完成洞内安装施工，溧阳大岔管洞内原位拼装新工艺，在以下几方面进行了技术创新：回转台车创新设计、拼装空间狭小的施工工艺创新、吊架的创新设计、局部整体滑移新工艺等。

2#引水系统 3 号钢岔管于 2014 年 12 月 19 日完成水压试验，共进行了两个循环，每次最高试验压力为 3.9MPa，试验压力按照 0~1MPa、1~2MPa、2~3MPa、3~3.9MPa 分阶段进行，升压速率 0.05MPa/min，保压时间 30min，卸压速率 0.05MPa/min，试验过程中进行了应力测试和声发射监控，同时对钢岔管的变形进行了测试。水压试验的结果，确认钢岔管均无漏水，声发射监控未发现异常声音，测量应力与计算应力基本一致，全部检测成果符合设计和规范要求。

在溧阳抽水蓄能电站面临地质条件差、工期紧、岔管施工困难等诸多不利因素，顺利完成了国内首个 800MPa 钢岔管洞内拼装焊接、水压试验，意义重大。

最后，通过溧阳抽水蓄能电站大型钢岔管洞内水压试验的顺利实施，填补了国内大型 800MPa 钢岔管在洞内做水压试验的空白，为解决抽水蓄能电站洞内大型压力钢岔管安装施工提供了新的思路，特别是复杂地质条件下的大型压力钢岔管安装施工，在工艺创新上进行了有益的探索和创新，施工安全和成本大大降低，可为同类压力钢管安装项目提供有益的借鉴和参考。<sup>[6]</sup>

## 参考文献：

- [1] 李伟 于文江 沈志松 抽水蓄能电站输水系统施工技术[M]. 中国电力出版社, 2007, 09.
- [2] 邹尚利, 杜冬梅. 单面焊双面成型焊接技术 [M]. 机械工业出版社, 2014.
- [3] 中国机械工程焊接手册 [M]. 机械工业出版社, 2001.
- [4] 钢结构焊接规程 [M]. 化学工业出版社, 2013.
- [1] 张为明, 于书满, 陈群运. 三峡压力钢管制作安装技术综述 [J]. 水电站压力管道, 2010(4):351~356.
- [2] 郭雪, 张河湾抽水蓄能电站埋藏式加劲月牙肋钢岔管设计 [J]. 水电站压力管道, 2010(4):290~295.
- [3] 李伟, 于文江, 沈志松. 抽水蓄能电站输水系统施工技术[M]. 中国电力出版社, 2007, 09.
- [4] 杨申仲, 李秀中, 杨炜. 特种设备管理与事故应急预案[M]. 机械工业出版社, 2013, 01.
- [5] 抽水蓄能电站输水系统安全控制与文明施工 [M] 中国电力出版社, 2007.

- [6、]西龙池抽水蓄能电站引水系统钢管制造安装工艺。《水电站压力管道》。中国电力出版社。2010。04月。398-405页。
- [7、]宋金兴。起重吊装安全技术[M]。(M)北京。冶金工业出版社。1988。
- [8、]陈绍蕃。《钢结构设计原理[M]。第2版。北京。》。中国建筑工业出版社。1998。第三版。
- [9、]汪正荣主编。《简明施工工程师手册[M]。北京。》[M]机械工业出版社。2004。
- [10、]《中国机械工程焊接手册[M]。北京。》[M]机械工业出版社。2001。
- [11、]钟善桐主编。《钢结构》[M]。武汉。武汉大学出版社。1991。

**作者简介:** 杨联东 (1969--) 男, 陕西西安, 中国水利水电第三工程局制造安装分局丰宁项目部, 项目总工, 研究方向: 金属结构及机电安装, 主要科研成果: 省部级科技成果奖八十项、国家工法1部、省部级工法 69 部, 授权专利 4865 项。发表论文: 核心期刊、国家级期刊、省部级期刊发表论文共计 26 篇。

**基金项目:** 2012年中国电力建设集团公司立项(合同编号: 2012-04)、溧阳抽水蓄能电站工程创优项目

**通讯地址:** 陕西西安米秦路15号安康汉滨区张岭水电三局基地管理中心(中国水电三局制造安装分局)。

**联系电话:** 18590962485 邮编7120503211 邮箱: yanglian\_dong@163.com。

- 1, piece's ising clear is the book full Chen2 Qun2 Yun4 pressure steel pipe in the Yangtse gorges creation to install a technique overview[J].The water electricity station pressure piping, 2010(4):351-356.
- 2, Guo snow Zhang He Wan pump water Xu ability electricity station the bury type add strength the crescent moon rib steel branch tube design[J].The water electricity station pressure piping, 2010(4):290-295.
- 3, Li3 Wei3 pump water Xu an ability an electricity station to lose water system construction technique at text river, Chen2 Zhi4 Song, [M].Electric power in China publisher, 2007, 09.
- 4, Yang2 Shen Zhong4, Li3 Xiu4 Zhong, Yang2 Wei3.Management and trouble of the special kind equipments meet an emergency to prepare a case[M].Machine industry publisher, 2013, 01.—
- 5, pump water Xu ability electricity station lose a water system safety control and civilization construction [M] China.2007 in the electric power publisher.—
- 6, west dragon the pond pump water Xu ability electricity station lead water system steel pipe a manufacturing gearing craft. 《Water electricity station pressure piping》.The publisher.2010.04 of the electric power in China month.398-405 page.
- 7, Sung gold interest heavy mourn to pack metallurgy in Peking of the safety technique(M) industry publisher 1988.
- 8, Chen2 Shao4 Fan . 《The steel structure design principle》.China building industry publisher.1998.Version 2.

9, Wang Zheng<sup>3</sup> Zheng<sup>3</sup> Qi<sup>2</sup> Qi<sup>2</sup> De<sup>5</sup> Rong<sup>2</sup>'s copy chief 《Jian<sup>3</sup> Ming<sup>2</sup> the construction engineer's manual》 the industry publisher.2004 of the [ M ] machine.

10, 《mechanical engineering in China weld a manual》 the industry publisher.2001 of the [ M ] machine.

11, the clock kind Tong copy chief 《steel structure》 the [ M ] publisher.1991 of the University of Wuhan.

---

**[作者简介:]** 杨联东 (1969—)，男，陕西安康人，中国水利水电第三工程局制造安装分局溧阳项目部，项目总工 教授级高工工程师，主要研究方向:为金属结构及机电安装。

通讯地址: 江苏省溧阳市平桥镇伍员山抽水蓄能电站中国水电三局项目部 (制安分局项目部)

联系电话: 18762822299 邮编 213334 邮箱: yanglian\_dong@163.com

**[基金项目:]** 2012年中国电力建设集团公司立项(合同编号: 2012-04)、溧阳抽水蓄能电站工程创优项目

**[获奖]**

课题获得中国电力建设集团公司 2014 年、2015 年 QC 小组成果三等奖。

课题拥有四项专利;

——3、两项创新技术获得陕西省 2014 年职工优秀技术创新推广运用项目。

**[来稿收稿日期:]** 2015 年 06 月 12 日=06=12

**800 MPa Gao strength water electricity use steel one side Han two-sided model to weld to experiment research**

Yang Lian Dong

(The water conservancy in China water electricity three engineering office limited company)

**Summary:** Aim at a 800 MPa class Gao strength water electricity use steel one side Han two-sided model, respectively pass porcelain and ceramics Chen mat with have no porcelain and ceramics Chen mat 2 sets weld to try knothole experiment, research two kinds of way to weld function of influence, and pass two sets of dissimilarity the thickness weld to try knothole to weld a craft assess work, from the mechanics function index sign, remnants remaining should dint etc. data argument the one side Han be two-sided to model at water electricity Gao strength steel top usage of possibility, especially the one side Han be two-sided model a craft for pressure steel pipe install the spot expansion usage empress of economy performance is huge, can consumedly before let up period the open of Tong room dig size and lower engineering to build price and shorten work period.

**Key Words:** 800 MPa class Gao Qiang2 Gang;The one side Han is two-sided to model;Weld a craft;Should dint test;Mechanics function;Chemistry composition.

## **~~Complications next 800 MPa of the geology condition large steel branch tube inside hole install and the water pressure experiment research~~**

Yang Lian Dong

(The water conservancy in China water electricity three engineering office limited company)  
China water conservancy and hydropower third countries Co., LTD

**Summary:** Abstract: [摘要] Aim at complications the environment descend a large 800 MPa steel branch tube to install construction inside hole of demand, combine the conveyance in the hole gearing characteristics, design appropriation turn round conveyance trolley, solved a large steel branch tube inside hole conveyance hard nut to crack. Mourn to pack to turn over a body in the hole in, aim at a Wei rock structure of geology condition, under the premise that not proper carry on big area to expand to dig, and have never mourn to pack for a day, anchor man make use of decoration of hanger inside the hole, slippery move trolley and steel landing stage to carry on a branch tube of unload a car, put together to pack, water pressure experiment, for large steel branch tube conveyance install, water pressure experiment provide new of way of thinking.

Aim at complications the environment descend a large 800 MPa steel branch tube to install construction inside hole of demand, combine inside hole conveyance install characteristics, design appropriation turn round conveyance trolley, solved a large steel branch tube inside hole conveyance hard nut to crack, mourn to pack to turn over a body in the hole in, aim at a Wei rock structure of geology condition, under the premise that not proper carry on big area to expand to dig, and have never mourn to pack for a day, anchor man, make use of decoration of hanger inside the hole, slippery move trolley and steel landing stage to carry on a branch tube of unload a car, put together to pack, water pressure experiment, for large steel branch tube conveyance install, water pressure experiment provide new of way of thinking, engineering to large steel branch tube the key in the hole construction the technique carried on thorough of research.

**Key Words:** Complications geology condition;Large steel branch tube;Conveyance;Install;The water

~~pressure experiment;The Li sun pump water Xu an ability an electricity station-[关键词]Complications-  
geology;800 MPa;Steel branch tube;Conveyance;Install:-The water pressure experiment~~