

790MPa 级高强钢

压力钢管制造安装及焊接施工技术研究

(Research on Fabrication-Installation and Welding  
Construction Technology of 790MPa Grade High Strength  
Steel Used in Pressure Pipes)

## 科研项目成果总结报告

中国水利水电第三工程局

二 00 七年十一月二十日

批准：付元初

审核：张育林

姬脉兴

周 林

编写：周 林

盛连才

15/11-2007

二 00 七年十一月

## 1、立项背景

引水式电站是水利发电的一种重要形式。抽水蓄能电站在我国近年来发展较快，输水系统是抽水蓄能电站枢纽的重要组成部分，输水系统的引水道有竖井和斜井两种形式，斜井与竖井相比，斜井水道长度短，水利过流条件好，具有节省投资，能提高电站效率等优点，但斜井的施工难度大，施工技术要求比竖井复杂，特别是大坡度超长斜井是近年来水电行业科技攻关的难点之一。

2003 年 8 月我局投标中标山西西龙池抽水蓄能电站引水系统土建及钢管制安工程标。该工程的输水系统采用一管两机布置，系统有二条输水隧洞，单线最长 1859.28m，**钢管安装高差 690.3m，正常发电水头 640m，最高发电水头 694.5m**，最低发电水头 620m，引水 1#洞和 2#洞分别为 1448.33m 和 1431.18m，单线引水斜井长 756.59m，其中上斜井长 515.474m，坡度 56 度，下斜井长 241.9m，坡度 60 度，最大开挖洞径 5.9m，最小开挖洞径 4.82m，开挖断面为马蹄。

在引水隧洞内，均安装有压力钢管，西龙池抽水蓄能电站是国家重点能源建设项目。引水压力钢管是水电站重要的组成部分，是连接水库和机组的纽带，具有较大的内水压力和外水压力。特别是抽水蓄能电站的引水压力钢管，由于机组不断地在发电与电动工况下变动，钢管承受的水压载荷也是交变的。

西龙池抽水蓄能电站的引水钢管的  $H \cdot D$  是全国最大的钢管，在世界上也为数不多。其设计的  $H \cdot D$  值达  $3553\text{m} \cdot \text{m}$ （岔管处的  $H \cdot D$  值达  $4162\text{m} \cdot \text{m}$ ）。设计采用了 SUMITEN510-TMC、SUMITEN610-TMC 控

轧和 SUMITEN780 调质三种钢板制造引水压力钢管。钢板的厚度  $\delta = 16 \sim 60\text{mm}$  不等，共有 27 个规格。我局虽有多個高强钢及调质钢焊接的成功先例，但其均是 600MPa 级的钢材，800MPa 级的调质钢我局还是首次施焊。但技术的发展不等人，高强钢板在水电站的钢管中的应用却会越来越广泛。

针对上述超长斜井运输、大量高强钢的使用的具体情况，对如何解决好该电站输水系统大坡度超长斜井洞内及空间弯管的管节运输难题，保证在高难度运输条件下的安全；厚板高强钢焊接残余应力分部情况的了解和控制；如何提高钢管制造、安装、焊接的自动化水平，达到任意位置（全位置）自动焊且无需辅助气体的目的，是施工安全、工程安全运行及工期保证的关键。如上述预期全部达到，开发出一套合理可行的大口径无导轨自保护全位置自动焊的焊接设备，研究总结一套适合长斜井大坡度及空间弯管钢管管节运输的施工工艺，总结出一套高强钢智能化机器人无导轨自保护全位置自动焊的焊接工艺规程，全面了解高强钢厚板焊接残余应力的分布规律，对提高我国水电系统斜井钢管技术水平，降低输水系统投资，提高电站安全运行的可靠性，降低事故率，有着重要意义。高强钢智能化机器人无导轨自保护全位置自动焊的焊接设备及焊接工艺，它不仅仅用于水电站的压力钢管安装，它在石油化工、造船、长输油气管线、市政等大口径的现场安装中具有更为广泛的应用。在提高劳动生产率的同时，真正体现以人为本，降低工人劳动强度，改善劳动条件。

## 2、科研项目的主要难点及研究内容

## 2.1、钢管制造安装的半自动焊和自动焊焊接方法

水电站压力钢管安装的焊接，到现在为止，国内外均采用焊条电弧焊和少量的  $\text{CO}_2$  气体保护焊，特别是材料为 570MPa 级以上的钢管安装，国内外全部采用的是焊条电弧焊，劳动强度大、效率低、质量受焊工操作技能水平和精神状态影响大，质量不稳定。而实现全位置自动焊的主要难点在于：

1) 大口径钢管焊接接头对装后坡口间隙偏差很难满足埋弧焊的要求。如果将管口按精密机加工的要求进行加工，其工程成本将急剧上升，经济上不合理，并且安装的焊接接头，存在有不可改变仰焊焊接位置，故仍不能采用埋弧自动焊。

2) 如采用气体保护焊，已经有单位进行了全位置的自动焊，由于受焊接材料、焊接热影响区的影响，最大用到 620MPa 级的热轧钢或控轧钢钢板的焊接，在调质钢上的焊接试验全部失败。

如采用双保护焊进行焊接，焊接材料本身可起到部分掺合金的作用，但仍然存在热影响区扩大，材料组织性能改变的影响，故在重要的构件中很少使用。

无论是采用气保护焊或是双保护焊，都同时存在有需要保护气体等辅助材料。常用的保护气体有 Ar 气， $\text{CO}_2$  气，Ar+ $\text{CO}_2$  混合气体，无论采用何种气体保护，均存在以下缺点：

第一、气体的用量大，工程成本会高居不下。

第二、盛装气体的辅助设施及工器具较多，现场搬运不便，增加了劳动强度。且气体的生产一般均集中在较大的工业城市，地处偏远

的水电、长输油气管道、石油化工的安装现场因气体采购困难，不但成本高，而且会影响工程进度。

第三、由于气体均是高压盛装，增加了施工现场的危险源。

第四、有较大风力时，气体则无法起到保护作用，故对焊接的作业环境要求较高，不适合于水电、长输油气管道、石油化工、造船等野外作业的焊接。

3) 根据以上综合比较分析，决定采用药芯焊丝自保护全位置自动焊。

## 2.2、焊接设备

为了克服埋弧焊、气保护焊、双保护焊固有的缺欠，准备试验药芯焊丝全位置全自动自保护焊。但有以下难点：

1) 调研国内外后知，药芯焊丝自保护焊的高强钢焊接，只在长输管道中有过使用的先例，并且采用的是半自动下向焊，未见到大口径的全位置自动焊的报道，且国内外均只有半自动焊设备。

2) 全位置自动焊，在小口径的管路焊中，已有不少的报道。一般采用的是轨道定位及导向，它适合于工厂位置固定且同规格批量较大的流水线作业，不适用于规格品种多、批量小、施焊位置不固定、管口尺寸大的安装现场。

3) 如果将小口径的轨道式全位置自动焊操作系统，去除轨道后与半自动自保护焊的焊接设备进行合成，则可以解决大口径的无轨道全位置自动焊。但存在以下难点：

第一、操作系统去除轨道后，如何进行焊枪的定位和导向。即必

须解决焊接过程中坡口的跟踪问题。

第二、半自动自保护焊焊口的识别，是依靠焊工的眼睛和大脑，实现自动化以后，如何对焊道进行识别，又是一个难题。

### 2.3、超长斜井的洞内管节运输问题

在长度达 540 余米的斜井洞内进行钢管管节的运输，并且还必须经过洞内空间弯管的转弯：如何保证运输安全并提高工效，是本次课题中又一难题。特别是洞内空间转弯的运输安全问题。

### 2.4、关于应力的测试与分析

采用 X 射线法，盲孔法或其它方法测试不同焊接方法焊后高强钢内应力的分布情况，为今后高强钢中厚板的焊接应力控制提供可借鉴的技术。提出高强钢厚板用不同的焊接方法、不同的焊接条件下应力的分布情况，为以后减小焊接残余应力提供科学依据。

## 3、科研项目的主要技术指标

### 3.1、钢管制造安装的半自动焊和自动焊焊接方法（见科研合同书第三页）

1) 最低目标：确定适合于安装现场使用的 600MPa 级和 790MPa 级半自动焊的焊接材料型号、规格、焊接工艺规程和焊接方法，并对用上述材料的型号、规格、焊接工艺规程和焊接方法所焊的焊接接头的机械性能、材料的工艺性能、质量保证情况进行结论性的评价。

2) 理想目标：确定适合于安装现场使用的 600MPa 级和 790MPa 级高强钢自动焊设备、材料、工艺规程、焊接方法并对用上述设备、材料、规程、方法施焊后接头的机械性能、材料的工艺性能等做出最

终的评价。

3) 在上述 1、2 的评价基础上, 整理出高强钢用不同焊接方法对不同板厚、坡口型式、坡口角度、接缝间隙、焊接位置、环境温度、湿度等焊接条件下进行焊接的全面工艺参数指导手册。对先行的焊接规范中的选材、预热、后热温度、应力消除与测试提出修改性意见。并形成该焊接工艺方法的实用焊接规程(工艺指导书)。

### 3.2、高强钢焊后内应力测试及内部应力分析(见科研合同书第三页)

1) 通过不同的方法进行应力的测试, 优选出满足钢管焊接内应力测试要求并经济易掌握的现场内应力测试方法。

2) 分析采用不同的焊接方法焊接高强钢的内应力分布情况, 提出高强钢厚板用不同的焊接方法、不同的焊接条件下应力的分布情况, 为以后减小焊接残余应力提供科学依据。

### 3.3、超长斜井大坡度钢管运输安装(见科研合同书第三页)

按期安全完成本工程项目, 总结出一套完整的高寒地区超长斜井、大坡度钢管洞内运输的工艺方法。

### 3.4、自动焊焊接设备方面(科研合同书外增加部分)

与高等院校等科研机构和设备制造厂联合, 开发出一套无轨式大口径安装现场自保护全位置焊接机器人。

### 3.5、自动焊焊接工艺方面(科研合同书外增加部分)

在西气东输已经应用的自保护半自动焊的基础上, 研究出一套适合于大口径厚壁管的自保护焊全位置自动焊的焊接工艺, 在焊接设备



开发完成，焊接材料选择合适，焊接试验合格，经全位置自动焊试验焊缝焊接完成形成焊接规程，并经项目成果技术鉴定后联系合适的工程进行实际应用焊接。

## 4、研究的总体思路及实施过程综述

### 4.1、研究的总体思路

由于我局过去没有使用过 790MPa 级钢板制造压力钢管，本工程的斜井又是我国水电行业中 790MPa 级钢板用量最多、钢管 H·D 值最大、钢管安装坡度最大，隧洞斜井运输距离最长且需进行洞内空间转弯的项目。我们确定了“树立科学发展、内外结合、引进吸收、抓住关键、精心施工、及时跟踪、阶段验收、确保基本、超前发展的原则”。以西龙池输水系统钢管制造安装工程这个载体，走科研与生产相结合的道路。学习国内外先进经验与自主创新之路，将项目分两步进行。

第一步，基本保证研究：首先做好超长斜井压力钢管的运输安全，管节洞内空间弯管的导向与转向，掌握高强钢焊接后残余应力的分布情况，确保按期完成合同的前提下，为超长斜井压力钢管的洞内运输安全，管节洞内空间弯管的导向与转向，高强钢焊接后残余应力的控制，总结一套适合高强钢的焊接及焊接热处理的施工工艺规程，提高我国高强钢的焊接、焊接热处理、焊接残余应力控制等的技术水平，改善作业条件，提高工程质量，减少安全事故。

第二步，提高性研究：对钢管安装全位置自动焊的方法、工艺、设备进行研发。改变钢管安装特别是材料为 570MPa 级以上的钢管安装焊接以焊条电弧焊为主，再加少量的半自动 CO<sub>2</sub> 气体保护焊或半自

动双保护焊为辅高劳动强度、低效率、质量受焊工操作技能水平和精神状态影响大、质量不稳定的现状。选择（开发）一套适合大口径钢管现场安装自动焊接的焊接设备，确定合适的焊接材料，探索出全位置自动焊的焊接工艺规程。为水电、石油、化工、造船、长输油气管道等大口径管道现场安装的自动焊探索出一条新路。

## 4.2、实施过程综述

### 1) 立项及经费筹集情况

西龙池电站输水系统工程我局于 2003 年 9 日中标，12 月签订中标合同。2004 年 8 月我局提出科研可行性报告，2004 年 12 月集团公司以中水电工[2004]33 号文将该项目立项，批准总科研经费 120 万元，其中集团公司投入经费 80 万元，自筹经费 40 万元。2005 年 8 月水电三局以技管[2005]2 号文将该项目立为科研项目。科研经费投入情况如表 4.2.1 所示。年度经费支出情况如表 4.2.2 所示。

### 年度科研经费投入情况表

单位：万元

表 4.2.1

集团公司	工 程 局	安装公司	西龙池施工局	合 计
80.00	20.00	20.00	14.00	134.00

### 年度科研经费支出情况表

单位：万元

表 4.2.2

主要支出项目	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	合 计
1. 新产品设计费	0.00	2.50	0.00			2.50
2. 工艺规程制定费	2.66	1.50	0.84			5.00
3. 设备调整费	0.00	4.75	0.00			4.75
4. 原材料及半成品试验	0.00	0.00	44.75			44.75

5. 技术图书资料费	0.00	0.06	0.03			0.09
6. 中间试验费	0.00	0.00	12.60			12.60
7. 研究机构人员工资	1.44	1.25	10.61			13.30
8. 设备折旧费	0.00	3.66	1.86		0.80	6.32
9. 与试制及开发有关的其他经费	4.05	1.26	6.40		16.74	28.45
1) 差旅费	4.05	1.02	2.86		3.60	11.53
2) 资料出版及验收费	0.00	0.00	1.10		13.14	14.24
3) 临时工工资	0.00	0.24	2.44			2.68
10. 外委费	0.54	0.00	6.00			6.54
11. 其它费	1.20	3.50	5.00			9.70
合 计	9.89	18.48	88.09		17.54	134

集团公司共计划投入 80 万元，工程局投入 20 万元，安装公司投入 20 万元，不足部分或是资金未到位时，均由西龙池施工局先行投入（详见附件：项目经费使用情况的报告）。

## 2) 第一步，基本保证研究

由于该项目施工难度大，科技含量多，且具有挑战性，我局又从未进行过用 790MPa 级钢材的制造和焊接，也未进行过空间弯管洞内管节的导向、转向和超长斜井中钢管的运输施工。故各级领导都非常重视，中标后，即要求将该项目列为科技攻关项目。2004 年初成立了科研小组，04 年一季度编制了科研进度计划和施工组织设计，并落实了人、财、物等各项准备工作。确立了不但要全面完成合同（包括工程合同，又包括科研合同），而且要在此基础上进行总结提高的指导思想。

第一步的难点集中在上斜井钢管的安装和运输。该井钢管于 2006 年 9 月开始进行安装，2007 年 9 月 2#钢管道全线贯通。预计 2008 年

2月1#钢管道全线贯通，4月钢管安装全面完成。

“790Mpa 级高强钢压力钢管制造安装及焊接施工技术”的科研项目在集团公司立项以来，集团公司和工程局领导高度重视，集团公司原副总经理，专家委员会主任付元初，副总工程师宗登峰，集团公司助理刘伟民，科技部李红春处长均多次进行现场指导工作。局长、副局长、局总工、局副总工及有关部门负责人更是二十余次到现场指导协调工作。施工局领导更是时时关心项目的进展情况。为保证项目的顺利实施，由集团公司付元初同志亲自挂帅，指定了水电三局安装公司总工程师兼西龙池施工局总工程师的周林同志为项目现场负责人，主持项目研究的日常工作，具体抓本课题的研究工作，并执笔编写了立项报告，可行性研究报告，科研计划，主持编写了钢管施工组织设计和部分施工措施，编写了科研总结报告和鉴定验收资料。业主单位、设计单位、监理单位也对项目给予了积极地支持，多次邀请专家顾问对该项目进行技术咨询，检查指导工作，如国家知名焊接专家朱国纲、杜天棕等多次来工地现场指导工作。集团公司于2005年11月和2006年9月分别对该项目进行了两次中间检查验收，这些措施有力地促进了科研项目的顺利进行。在第一步基本保证研究的基础上，进行第二步提高性研究。下面以专题形式对第二步的提高性研究进行叙述。

## **5、提高性研究过程综述**

### **5.1、提高性研究的主要难点：**

提高性研究的主要难点有以下几个方面：①研究方向及方法的确

定；②研究方向国内外研究的现状，避免重复性研究；③是否进行新设备的开发以及如何进行开发；④实际应用的时机。

1) 研究方向及方法：根据集团公司有关领导及科技部的要求、国内外类似课题的研究现状，课题组确定将提高性研究方向定为：无轨式大口径管道安装现场自保护全位置自动焊。

2) 研究方向国内外研究的现状：①在较小口径的厚壁管的焊接中，采用轨道式全位置自动焊，在国内外已经有多年的应用。应用范围一般为制造工厂；②大口径厚壁管的自动焊接，在平焊、立焊、横焊中也均有成功的应用；③上述①、②项的自动焊，除埋弧自动焊外，采用的是气保护焊或双保护焊，并且为有轨导向操作，这类焊接方法有其不可克服的缺欠（前面已经叙述）；④大口径厚壁管的自保护焊，国内外现在最好的发展水平为西气东输中应用的自保护半自动焊。

3) 焊接设备：目前国内外没有成熟的无轨式大口径管道安装现场自保护全位置自动焊设备。已经有自保护半自动焊设备，有轨道式小口径全位置气保护焊及双保护焊设备。

4) 实际应用时机：焊接设备开发完成，焊接材料选择合适，焊接试验合格，经全位置自动焊试验焊缝焊接完成形成焊接规程，并经项目成果技术鉴定后联系合适的工程进行实际应用焊接。

## 5.2、实施过程

1) 调研：从焊接设备、焊接材料、焊接工艺方法等方面，对国内外进行了广泛的调研，在焊接设备方面，对松下、林肯、伊萨、ABB、上焊、熊谷、威达、南通焊机、哈尔滨焊研、西安交大、北京石化学

院等十几个设备制造商、科研机构或高等院校进行了调研。在自保护焊接材料方面，对神户焊材、HOBART、LINCOLN、高丽熔接、天泰焊材、哈尔滨焊研、大西洋焊材、上海焊材、天津金桥等十几个材料生产商、科研机构进行了调研。在焊接工艺的实际应用方面，先后到浙江桐柏、江苏宜兴、河北章河弯、西气东输、四川天驰油气田股份有限公司等工程、公司进行学习、调研。

2) 焊接设备研发：在广泛调研的基础上，决定与北京石油化工学院、成都熊谷电气制造公司联合，由我方牵头，北京石油化工学院为技术主体，以其现有的轨道式全位置焊接机器人、成都熊谷电气公司的半自动自保护焊机为基础，合成无轨式大口径管道安装现场自保护全位置自动焊设备。

由我局提出相应的技术要求及指标，提供全位置焊接的实物试件及焊接材料、焊接操作技工、半自动自保护焊机，北京石油化工学院负责设备整体技术接口，进行设备的不断改进与完善。2006 年 8 月开始进行此项工作的意向性交流，进行技术要求及指标的确定，合作方式的探讨，2007 年 3 月签订《共同开发全位置焊接机器人的科研合作合同书》（见附件）。2007 年 6 月底设备运至西龙池工地现场。在此期间，我局项目负责人多次到学院交流意见，并派技师杨党辉同志到学院全过程参与设备的改进、操作调试、模拟试焊工作。我方提供全位置焊模拟试件和焊接材料，由焊接技师在学院进行焊接，根据焊接中发现的不足，再由学院进行不断地改进。合作方熊谷电气公司也先后几次派人到学院进行设备的改装。学院方面由北京光机电装备

重点实验室主任、博导蒋力培教授亲自挂帅，副主任、博导薛龙教授主抓，光、机、电、IT 等多学科人员共参加研发。这些措施保证了设备的研发进度。在设备运至工地现场后，学院先后十余人次到现场进行设备的调试、改进，其中包括薛龙教授等专家，熊电气公司也两次派人到工地完善设备。这些措施保证了设备的正常工作。

3) 焊接材料的选择与工艺试验

根据对各焊接材料生产厂商调研的结果，初步选用了 HOBART、LINCOLN、天津金桥共三个品牌的不同强度等级的自保护药芯焊丝进行试焊。三种焊接材料的基本指标比较见表 5.2

因焊件和焊接材料一定的情况下，焊接的自动化程度并不是焊接接头机械性能的决定性因素，为降低成本，节约资金，首先用半自动焊对上述材料进行了试验性焊接。

无轨式大口径管道安装现场自保护全位置自动焊设备运到工地后，用该设备在双 45°斜角固定的情况下，用上述材料分别进行了双面无导轨自保护全位置自动焊。焊接结果见附件《自保护全位置自动焊焊接工艺评定报告》。

三种焊接材料比较表

表 5.2

材料生产商	型 号、规 格	适用钢材级别	执 行 标 准
HOBART	E71T8-Ni1J, 5/64"	680~720MPa	AWS A5.29 及 ASME SFA-5.29
LINCOLN	E71T8-K6, 5/64" , NR-207+	600~620MPa	AWS A5.29 及 ASME SFA-5.29
	E81T8-G, 5/64" , SP-88P	800MPa	AWS A5.29 及 ASME SFA-5.29
天津金桥	JC-29Ni1, Φ2.0mm, E71T8-Ni1,	500~520MPa	GB/T 17493-1998, AWS A5.29-2005

	JC-30, $\Phi 2.0\text{mm}$ , E81T8-Ni2	600~ 620MPa	暂无 GB, AWS A5.29-2005
--	---	----------------	--------------------------

在进行完上述的焊接评定后,用 $\delta=22\text{mm}$ 的 SUMITEN510-TMC 控轧钢和 $\delta=54\text{mm}$ 的 SUMITEN780 调质钢分别卷制了两个试验管节进行试焊。试验管节的直径分别为 $\Phi 3140\text{mm}$ 和 $\Phi 4000\text{mm}$ 。具体要求见附件《全位置自动焊试验管节的制造要求》。

将试验管节模拟工地的实际安装位置固定,进行无轨式大口径管道安装现场自保护全位置自动焊的实际焊接,在焊接的过程中不断地调整焊接工艺参数、不断地修改完善调控参数并进行记录和整理。

## 6、科研成果综述

### 6.1、关于应力的测试与分析

采用压痕法,对 SUMITEN610-TMC 控轧和 SUMITEN780 调质两种钢板采用埋弧自动焊和焊条电弧焊的焊缝进行了应力测试,基本了解了用埋弧自动焊、焊条电弧焊焊后该高强钢残余应力分布情况。各焊缝应力测试结果见《西龙池抽水蓄能电站引水压力钢管焊缝残余应力测试报告》,为今后高强钢中厚板的焊接应力控制提供了可借鉴的技术参数。该测试由国电郑州质检中心进行测试和报告。报告指出:

1) 测试结果表明:

①残余应力普遍为拉应力,只有少数部位为压应力。

②上斜井段的 SUMITEN610-TMC 钢管焊缝的残余应力较低,大都在钢板材料的屈服强度以下,少数测点的应力测量值超过钢板材料的名义屈服强度。

③中平段和下平段的 SUMITEN780 钢管焊缝的残余应力测试值较



高，部分数据超过了材料的名义屈服强度。

④岔管附近因为拘束度大，焊缝残余应力明显偏高。

⑤外壁测点的残余应力测试值较低。

2) 数据分析如下：

①导致焊接残余应力高的原因，一是焊缝金属的实际屈服强度高（远高于其名义屈服强度），一是拘束度大。

②外壁测点的残余应力测试值较低，对钢管运行有利。

③高的焊接残余应力对钢管的运行有一定的不利影响，但在钢管材料塑性较好、焊缝内部质量好的前提下，影响不大。

④第一次充水试运行后，工作应力和残余应力叠加，会使局部焊缝发生塑性变形，从而降低残余应力，起到削峰的作用。

3) 报告结论

西龙池抽水蓄能电站引水系统压力钢管的焊接残余应力较高，这与钢板及焊缝熔敷金属的高强度有关，也与焊接工艺及拘束条件有关。通过钢管道充水试验以后，焊缝残余应力会有较大幅度的降低。

## 6.2、钢管焊接

工程的施工中，严格控制焊接线能量的输入，确定合理的焊接顺序，对焊接接头进行了合理的预热和后热处理，近万吨钢管制造安装完毕，特别是7000多吨高强钢管、6000余吨厚板调质钢焊接完毕，未产生一次裂纹，创造了高强钢厚钢板在钢管制造安装中的奇迹。对实际应用中的《焊接工艺指导书》重新进行了修改、补充、完善，编制了《山西西龙池压力钢管制造安装焊接工程总结报告》。并形成了

600MPa 级和 800MPa 级高强钢通用的焊接工艺指导书：《焊接工艺规程》。

该工程被中国工程建设焊接协会评为 2007 年度全国优秀焊接工程（见获奖证书）。

### 6.3、钢管洞内运输及安装

钢管安装成果，见专题《钢管安装总结报告》。

本工程根据合同约定的净安装施工时间为 28 个月。但是由于钢板到货迟缓以及交面工期延误原因，实际施工工期不足 18 个月。实际施工过程中达到了安装、焊接、回填施工平均 1 天/ m 的较高进度水平。并创造了钢管安装及混凝土回填的世界新纪录。本安装施工方案，突破规范常规，在满足规范要求的基础上，省成本，解决了大吨位、长距离隧洞内管道安装运输的难题。主要以下几方面的成果：

1) 优化施工方案：①两条隧洞共同采用一台卷扬机，减少 35 吨卷扬机两台，降低成本约 60 万元。②将两条隧洞的卸车点集中到一处，并且将卸车点转移到回填封堵区之外，一方面减少了开挖以及混凝土回填量，另一方面卸车设备减少了 3 台套，共减少成本 430 万元。

2) 钢管安装创多项纪录：①2007 年 4 月在西龙池抽水蓄能电站输水系统 2 号上斜井钢管安装及混凝土回填工程中，月施工 75 米，创钢管安装及混凝土回填月平均进度世界新纪录（第十二批）。②山西西龙池抽水蓄能电站输水压力钢管制造安装的施工中，于 2006 年 1 月至 2007 年 10 月创国内水电站钢管制造安装单个工程 800MPa 级钢用量最多、管壁最厚纪录；创国内水电站钢管制造安装 HD（3553m·m）值最大纪录；创国内水电站同类直径引水压力钢管单条斜井安装最长纪录。创同直径钢管水头最高纪录（第十三批）。

3) 钢管制造、安装中，申请专利 3 项：①采用排轮导向，一方

面解决了转向轮的不可操作性，同时大大降低成本，并申请实用新型设计专利《一种大直径钢丝绳的转向装置》。②为提高钢管制造安装中圆度调整和环缝对装速度及质量，设计并申请新型实用专利《新型压力钢管道专用液压式圆度调整及错边调整装置》。③专利《新型的轨道运输断绳保护装置》是一种斜井（陡坡）轨道运输牵引钢丝绳突然断裂时的安全保障（保护）装置，该装置用于在陡坡施工中轨道运输车的牵引钢丝绳突然断裂时，可自动对轨道车（台车）进行紧急制动而避免失控，从而达到保护轨道运输车的目的，保障轨道车及车载物质及人员安全。

#### 6.4、钢管安装自动焊

见专题《无轨式大口径管道自保护全位置自动焊研究成果报告》。

本课题所配套成的无轨式大口径管道安装现场自保护全位置自动焊设备，成功地取消了自动焊接设备的轨道，使自动焊设备的使用范围更加广泛；将自保护焊由半自动提升到了自动焊，技术上有了较大的进步；采用自保护全位置自动焊焊接设备和方法，选用国产 JC-29Ni1， E71T8-Ni1，及 JC-30， E81T8-Ni2 药芯自保护焊丝所进行的焊接工艺评定，数据完整，技术指标达到了设计和 DL5017-93 规范及其引用标准的要求，结果合格。根据实验综合评定结果，所用的各技术参数和选定的焊接材料可用于指导 500MPa 和 600MPa 级钢材的自保护全位置自动焊的生产性焊接。

1) 申请专利 2 项：①以北京石油化工学院的焊接机器人和熊谷电气公司的自保护半自动焊机，经改装合成并申请了《大口径管道及球罐用无轨式自保护全位置自动焊装置》的新型实用专利；②实现了

500MPa 和 600MPa 级钢材无轨式自保护全位置自动焊的实物焊接，且焊接工艺经评定合格，并申请了《无轨式自保护全位置自动焊接装置及其焊接工艺》的工艺发明专利。

2) 形成了符合 DL5017-93 规范及其引用标准的要求的 500MPa 和 600MPa 级钢材的自保护全位置自动焊的焊接工艺评定报告。

3) 采用智能化机器人的无轨式自保护全位置自动焊设备对大管径高强钢的 SUMITEN510-TMC 钢和 SUMITEN610-TMC 钢环缝进行了无轨式全位置自保护全自动焊，焊接接头外观成型美观、内部质量优良、接头性能稳定。在大管径全位置全自动焊的焊接方法上是国内外首创。并以此编制完成了《大口径管道、储罐安装现场无轨式自保护全位置自动焊施工工法》。

4) 发表或在全国行业协会交流论文 3 篇，其中有两篇是中文科技核心期刊上发表。

5) 以轨道式全位置焊接机器人、半自动自保护焊机为基础，改造合成了现在的无轨式全位置自保护全自动焊接装置，填补了焊接设备的空白。将小管径的有导轨全位置自动焊，转换为了大管径无轨式全位置自保护自动焊。

6) 由高强钢需要外加气的气保护或双保护自动焊，实现了无需外加辅助气体的自保护焊全位置自动焊。

## **7、本项目科技成果的亮点**

7.1、创造了两项纪录：①2007 年 4 月在坡度 56 度，长 515.474m，钢管直径 4700mm 的陡坡钢管安装及混凝土回填中，采取合理的综合

施工措施，输水系统 2 号上斜井钢管安装及混凝土回填工程中，月施工 75 米，创钢管安装及混凝土回填月平均进度世界新纪录；②山西西龙池抽水蓄能电站输水压力钢管制造安装的施工中，于 2006 年 1 月至 2007 年 10 月创国内水电站钢管制造安装单个工程 800MPa 级钢用量最多、管壁最厚纪录；创国内水电站钢管制造安装 HD(3553m·m) 值最大纪录；创国内水电站同类直径引水压力钢管单条斜井安装最长纪录。创同直径钢管水头最高纪录。

7.2、钢管安装工期：本工程根据合同约定的净安装施工时间为 28 个月。但是由于业主钢板到货推迟以及交面工期延误，实际施工工期不足 18 个月。实际施工过程中达到了安装、焊接、回填施工平均 1.5m/ 天的较高进度水平。并创 75m/月安装回填的世界新纪录。

7.3、成本节约：在本工程的施工中，不断优化施工方案，突破常规，另辟新路，在满足安全要求的基础上，匠心独到的完成安装运输方案设计，节省成本，解决了大吨位、长距离隧洞内管道安装运输的难题。比投标方案节约成本达 500 余万元。

7.4、共申请专利 5 项：其中工艺发明专利 1 项；新型实用专利 4 项。

7.5、探索了水电站引水压力钢管安装新的焊接方法：无轨式自保护全位置自动焊接工艺。其焊接工艺包括以下步骤：在焊接接头边缘粘贴光电跟踪导向用的导向线；通过光电跟踪装置扫描焊接接头的焊口断面尺寸及焊口断面与导向线的相对位置，并进行自动模糊记忆；根据扫描结果向控制系统中输入焊接工艺参数，或由控制系统自动选取焊接工艺参数，并进行自动模糊记忆；控制系统控制行走小车

沿导向线行走，通过固定在行走小车上的半自动自保护焊机的焊枪焊接，对接头坡口没有特别要求。该工艺在保证获得优良焊接接头的同时，也能提高焊接效率，降低劳动强度且节约工程成本。已经用该方法完成了 500MPa 和 600MPa 级钢材的自保护全位置自动焊的焊接工艺评定和试验管节的焊接，质量合格。

7.6、用全新的焊接方法——自保护全位置自动焊对 500MPa 和 600MPa 级钢进行焊接工艺评定，并形成了焊接工艺评定报告。且该报告按 DL5017-93 规范及其引用标准评定为工艺合格。

7.7、完成了《大口径管道、储罐安装现场无轨式自保护全位置自动焊施工工法》。

7.8、采用压痕法，对焊缝进行了应力测试，基本了解了用埋弧自动焊、焊条电弧焊焊后该高强钢残余应力分布情况，为今后高强钢中厚板的焊接应力控制提供了可借鉴的技术参数。并对残余应力产生的原因、对运行安全的利弊、在运行过程中的降低和削峰均进行了分析，便于对今后工程施工的指导。

7.9、在课题的进行中，形成了多个技术报告或施工工法，发表或交流了多篇论文，为技术的推广应用起到了积极的作用。

7.10、在斜井钢管运输及安装中采用了《一种大直径钢丝绳的转向装置》、《新型轨道运输车断绳保护装置》、《新型压力钢管道专用液压式圆度调整及错边调整装置》等专利技术和其它各种综合安全措施，整个施工过程未发生一起安全事故，与传统施工工艺相比，大大降低事故率。