

# 压力管道

主编 刘东常  
刘宪亮

Y A L I G U A N D A O



黄河水利出版社

# 压 力 管 道

刘东常 刘宪亮 主编

黄河水利出版社

---

## 内 容 提 要

《压力管道》一书共收入论文 47 篇, 论文包括压力钢管研究及应用、设计理论及方法、试验研究、施工及管理、材料及加工等五个方面的内容。其研究内容大都以三峡、小浪底等大型水利工程为背景, 反映了我国水利科技工作者和工程技术人员近四年来在压力管道设计理论及工程实践方面的研究成果。

本书可供从事水力发电工程的科技工作者、研究生及大专院校师生参考。

## 压 力 管 道

刘东常 刘亮亮 主编

---

责任编辑: 雷元静 邵志峰

责任印制: 常红昕

责任校对: 赵宏伟

出版发行: 黄河水利出版社

地址: 河南省郑州市顺河路黄委会综合大楼 12 层

邮编: 450003

印 刷: 黄河水利委员会印刷厂

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

版 别: 1998 年 4 月第 1 版

印 次: 1998 年 4 月郑州第 1 次印刷

印 张: 20.75

印 数: 1 - 1000

字 数: 467 千字

---

ISBN 7-80621-077-6/TV·77

定 价: 42.00 元

## 第四届全国水电站压力管道学术会议

### 技术委员会

潘家铮(院士)

(以下按姓氏笔画为序)

马善定(教授)	谷兆祺(教授)
陈式慧(研究员)	林秀山(教授级高级工程师)
赵中极(教授)	赵业安(教授级高级工程师)
徐麟祥(教授级高级工程师)	钱忠柔(教授级高级工程师)
谢才萱(教授级高级工程师)	董哲仁(教授)
董毓新(教授)	雷克昌(教授)

### 组织委员会

主任	冯国斌				
副主任	马善定	王威儒	林大钧	刘东常	
委员	李 珠	刘宪亮	冯跃志	金树训	姚文艺
	刘 杰	鲁一暉	孙大凤	郭雪莽	苏志祥
	杨彦平	赵玉双	何 杰	于永军	

### 论文编委会

刘东常	刘宪亮	李 珠	金树训	郭雪莽	尚宏琦
刘琰玲	赵 瑜	孟闻远	白新理	唐克东	苏志祥
胡建兰	温新丽	赵新铭			

# 序

压力管道是水电站建筑物中的关键结构之一。压力管道的设计、制造、施工和安全监测等技术问题一直是水电开发中的重要研究课题。我国学者和工程技术人员曾对此作出过重要的贡献,已开过多次全国性学术会议进行总结和交流,取得很好的效果。

我国拥有得天独厚的水力资源,近年来加快了开发大型水电的步伐。目前已开发的水电容量接近 6 000 万 kW, 正在修建世界上最宏伟的三峡工程和许多大型水电站,我国已成为世界水电大国。与此相应,压力管道日益趋向巨型和超巨型化。常规的型式和设计方法已渐不能满足要求,人们不断寻求新的压力管道类型和更合理的结构型式,探索更深层次的问题,同时,对压力管道结构性能的要求也愈来愈高。实践的需要,推动了科研的发展,反过来,科研攻关的成果又推动了工程的建设。近十多年来,我国压力管道科技的进展是十分迅速的,成绩是令人鼓舞的。

尽管我们的成就是巨大的,但和资源蕴藏量相比,水电开发率仍然很低。今后,继续大力开发水电,不仅是国民经济和电力工业发展之所需,更是实现能源可持续发展的必行之路。这是党中央和国务院多次明确和强调过的方针。因此,放眼新的世纪,我国还将兴建更多的大型乃至巨型的常规水电站和抽水蓄能电站,这是历史的必然。这意味着在压力管道的研究领域,将有更多更艰巨的课题需攻关,有更多的先进结构型式需要开发、应用和推广。为了迎接挑战,水利科技工作者首先需要进一步系统总结在广泛的工程实践中已取得的成就,才能不断完善、改进,以跃登新的台阶。

这本书就是本着这个目的编写的。本书收集的 47 篇论文,系统地反映了我国近年来在压力管道的理论研究、工程设计、施工安装和运行管理等方面取得的丰硕成果,全面总结了我国压力管道的成功建设经验。本书所述不仅包括了各种形式的压力管道、蜗壳和岔管,而且涉及的工程面广,包括世界上最大的三峡水电站、工程最复杂的小浪底水电站、十三陵抽水蓄能水电站及国内其它大中型水电站,内容丰富,信息量大,具有较高的学术水平和工程应用价值。特别值得一提的是,本书中关于压力管道的稳定性数值模拟、非线性分析、结构优化设计等一批优秀论文,均达到了国际先进水平。

我相信,在我国长江三峡、黄河小浪底顺利截流和我国水利水电建设事业蓬勃发展的大好形势下,本书对于进一步提高我国压力管道的设计水平,推动我国水力发电事业的发展,将起到促进作用。

长江后浪推前浪,技术发展永无止境,让我们举起双手,迎接新世纪的到来吧!

潘家铮

1998 年 1 月

· 1 ·

# 前 言

我国长江三峡、黄河小浪底成功截流,标志着我国水利水电建设事业已进入一个新的发展阶段。近年来,随着我国水力发电事业向高水平、高质量、高科技、大规模快速发展的大好形势下,召开第四届全国压力管道学术讨论会,并出版论文集《压力管道》,对于进一步丰富我国水电建设技术宝库无疑是一次很有意义的实践。

书中研究论文,以我国水电建设工程为背景,系统地介绍了我国近年来在压力管道的理论研究、工程设计、施工安装和运行管理等方面取得的丰硕成果,全面总结了我国压力管道的成功建设经验。论文中,对于世界上最大的三峡水电站压力管道的布置选型、工程设计、结构分析等开展了大量的科技攻关,在结构非线性仿真分析理论、优化设计、大比尺结构模型试验等方面,取得了一项又一项具有国际先进水平的科技成果;小浪底水电站地下立体大型洞群密集交错,工程复杂程度世界罕见,该工程在高边坡、大洞室的岩体稳定及空间洞群的布置、设计与施工等方面取得了一系列优秀成果。十三陵、羊卓雍和宁波溪口等大型抽水蓄能电站从规划设计到建设施工,也都积累了丰富的经验。

本届会议的论文集《压力管道》,共收集论文 47 篇,全书分研究及应用综述、设计理论及方法、试验研究、施工设计及管理、材料加工及其它五个部分。本书全面展示了我国水力发电建设者近几年在压力管道理论研究方面取得的丰硕成果,系统总结了我国压力管道的成功建设经验。本书不仅包括了各种形式的压力管道、蜗壳和岔管的理论及实验研究成果,而且涉及到以某些工程为背景开展的施工工艺、原型观测、钢管制作及材料防腐等方面的研究问题。从电站类型来看,它包括了各种规模的水电站,其中有常规电站、抽水蓄能水电站及已建、在建、待建水电站,涉及的工程面广。本书内容丰富,信息量大,具有较高的学术水平和工程应用价值。特别是本书中关于压力管道的稳定性数值模拟、结构非线性分析、结构优化设计等一批优秀论文,表明我国水电建设者在该研究领域已居国际先进水平。

中国科学院院士、中国工程院院士、中国工程院副院长潘家铮先生为本书作序,董哲仁教授为本书的出版发行给予了极大的关怀和支持。同时得到了马善定教授、赵中极教授、林秀山高级工程师、王咸儒高级工程师、林大钧高级工程师等人的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。向给予本届会议支持和赞助的华北水利水电学院、黄河水利委员会勘测规划设计研究院、小浪底水利枢纽建设管理局、河南省水利勘测设计院等单位表示衷心的感谢!

论文编委会

1998年1月

# 目 录

序.....	潘家铮(1)
前言.....	(1)

## 研究及应用综述

三峡水电站引水压力管道技术设计审查综述 .....	魏永晖(1)
水电站压力管道的应用、发展与研究 .....	刘宪亮(8)
三峡电站引水压力管道设计研究 .....	陈际唐(19)

## 设计理论及方法

### 大型水轮机蜗壳充水加压结构形式三维有限元

分析 .....	匡会键 伍鹤皋 秦继章 马善定(25)
钢衬钢筋混凝土压力管道混凝土裂缝温度张合量数学模型 .....	董哲仁(29)
加劲压力钢管结构优化设计 .....	刘宪亮(34)
常规荷载作用下厂坝联结形式优选 .....	刘宪亮(44)
坝内埋管温度应力 .....	伍鹤皋 马善定(54)
三峡电站压力管道温度变化的结构强度和变形研究 .....	熊德炎 龚国芝(60)
地下埋管在外压作用下稳定性问题的半解析有限元方法及其 应用 .....	刘东常 孟闻远 刘宪亮(65)
环向加劲压力钢管稳定性分析的 YGWDF 程序 .....	刘东常 孟闻远 刘琰玲(70)
天生桥二级水电站闸门井倒塌事故水力过渡过程仿真计算 .....	刘保华(77)
宝泉抽水蓄能电站高压钢筋混凝土岔管有限元分析 .....	刘庆亮 景来红 王重工(85)
宝泉抽水蓄能电站高压隧洞衬砌结构设计 .....	田雨普(91)
三峡电站压力管道钢衬预应力钢筋混凝土结构设计 研究 .....	乐东义 吴晓玲 刘劲松(100)
槐扒黄河提水工程泵站岔管设计 .....	朱世东 徐银明(111)
环形预应力混凝土技术及其在圆筒形结构中的应用 .....	赵顺波(116)
钢衬-预应力混凝土压力管道结构受力 分析 .....	赵顺波 陈文义 朱尔玉 李树瑶(122)
联合受力调压井钢衬的有限元分析 .....	吴明 钟秉章 陆强(130)
调压井下室钢衬有限元分析 .....	林华 吴明 钟秉章 陆强(138)
水电站岔管设计方案优选一例 .....	陆强 钟秉章 吴敏(144)
龙滩水电站设置尾水气垫式调压室问题的探讨 .....	黄程深(149)
宝泉抽水蓄能电站引水系统稳定计算及分析 .....	毛艳艳 郑莉玲(158)

## 试 验 研 究

坝内埋管仿真材料结构模型试验 .....	龚国芝	伍鹤皋	马善定 (163)
仿真材料结构模型反复加载试验的研究 .....	秦继章	匡会键	伍鹤皋 马善定 (168)
东津水电站月牙式内加强钢岔管结构设计及原型应力测试 .....	陈祥荣		陈宏钧 (173)
三峡水电站引水压力管道上弯段结构模型试验研究 .....	张仲卿	梁政	魏有健 (181)
十三陵抽水蓄能电站压力管道钢岔管的设计与试验研究 .....	王官振		王建华 (190)
宁波溪口抽水蓄能电站充水加压蜗壳混凝土结构设计 .....	姜和平		石世忠 (202)
西藏羊卓雍湖抽水蓄能电站高压钢管的研究设计 .....	马连升		胡克让 (206)
二滩水电站座环蜗壳安装和水压试验 .....	周关炳		汪炳舜 (210)
大型水电站进口临界吸气深度的水力试验研究 .....	马吉明		刘德朝 (220)

## 施工设计及管理

三峡水利枢纽左岸电站压力引水管道施工研究 .....	张五一	黄策 (226)
一种预应力混凝土隧洞衬砌的新技术 .....		亢景富 (233)
小浪底工程压力钢管的施工设计 .....		苏志祥 (237)
小浪底 1 号明流泄洪洞埋管段开挖支护设计 .....	刘杰	凌霄 周森 李刚 (245)
波纹管伸缩节及其应用 .....	吴友邦	郁福义 钟秉章 (250)
宝泉抽水蓄能电站钢筋混凝土岔管位置选择 .....	刘庆亮	景来红 王重工 (256)
胜利油田调水工程压力管线施工管理 .....	袁涛	申来宾 (261)

## 材料、加工及其它

月牙形内加强岔管肋板钢材选用和焊接 .....	陈继深	谷鸿飞 (264)
高性能压力容器及压力钢管用 WH510 钢、WH530 钢的 研制 .....	陈晓	李书瑞 郭爱民 董汉雄 (278)
高性能 WDL 系列钢的开发及应用 .....		陈晓 (285)
上河坝水电站压力钢管凹坑缺陷分析和安全 评定 .....	雷斌隆	王光钦 孙鸿 陈辉 (293)
槐扒黄河提水工程泵站管道方案及类型选择 .....		徐银明 (299)
黄河小浪底水利枢纽工程压力钢管瓦片的卷制 .....	赵玉双	陈天杰 (303)
黄河小浪底水利枢纽工程引水压力钢管的焊接 .....	赵玉双	陈天杰 (308)
建立组合工装设备的方案确立及优化 .....		刘康斐 (316)



# 三峡水电站引水压力管道技术设计 审查综述

魏 永 晖

(中国长江三峡工程开发总公司技术委员会,北京 100062)

**提 要** 长江三峡水利枢纽水电站引水压力管道条数多、直径大、水头高、 $HD$  值大,采用钢衬钢筋混凝土联合受力结构。在技术设计阶段对重大技术问题作了不少科学研究和试验工作,取得了丰硕的成果,不仅满足了本工程的需要,而且可供其它水利水电工程参考。本文对上述成果作一综述。

**关键词** 三峡工程 压力管道 钢衬钢筋混凝土 联合受力 科研成果

长江三峡水利枢纽主要建筑物包括大坝、水电站和通航建筑物三大部分。枢纽布置总格局为:泄洪坝段位于河床中部,两侧分设左右岸两个坝后式电站,通航建筑物布置在左岸靠里。水电站装机 26 台,单机容量 700MW,总装机容量 18 200MW。左岸厂房共 14 台机组,右岸厂房共 12 台机组。

厂房坝段每个机组段长 38.3m,引水压力钢管采用一机一管引水方式,共 26 条,钢管直径 12.4m, $HD$  值达 1 730m<sup>2</sup>。其直径和  $HD$  值在当今世界上居首位。从进水口至渐变段,长 25.5m,为无钢衬钢筋混凝土结构。从渐变段至上弯段起始点,长 26.3m,为坝内埋管。以后为上弯段、斜直段和下弯段,共长 85m,为浅槽背管段,采用钢衬钢筋混凝土管。下弯段以后至厂坝分缝间的下水平段留有伸缩节位置。

在技术设计阶段,对背管段的结构形式作了审定。在此基础上,三峡总公司技术委员会根据设计单位的需要,安排了一些科学研究和试验工作,取得了一些可喜的成果。此外总公司还邀请俄罗斯专家对钢衬钢筋混凝土管道的施工和安装进行了咨询,并组织有关技术干部去俄罗斯考察,均有一定的收获。本文将上述情况作一综述。

## 一、压力管道结构形式选择

长江水利委员会于 1993 年 12 月在《水电站压力管道形式选择专题报告》中,提出明管和钢衬钢筋混凝土两个方案,并推荐采用明管方案。

### (一) 明管方案

选用进口 588N/mm<sup>2</sup> 钢材,板厚 32mm~54mm,管外壁设有加劲环、支承环和锚固设备。钢管上部外侧包有 1.0m 厚的混凝土,以降低由于直接日晒而引起的温度应力。本方案需用 588N/mm<sup>2</sup> 钢材 3.09 万 t,16Mn 钢材 0.82 万 t,钢筋混凝土 9.78 万 m<sup>3</sup>,混凝土 2.95 万 m<sup>3</sup>。

## （二）钢衬钢筋混凝土管方案

钢衬与钢筋混凝土联合受力，组合结构的承受内水压力的安全系数，根据科研成果和工程经验确定为 2.20。钢衬厚度按单独承受内水压力时的应力满足  $0.8 \sim 0.9 \sigma_s$ （钢材屈服强度）条件确定，厚度 30mm~36mm。钢筋混凝土厚度 2m，标号采用 250<sup>#</sup>，配置直径为 32mm~45mm 的钢筋三排，间距 20cm。本方案需用 16Mn 钢材 2.60 万 t，钢筋混凝土 20.43 万 m<sup>3</sup>，钢筋 2.11 万 t。

## （三）方案比选

三峡总公司技术委员会于 1994 年 1 月在北京召开了专家会，审查了长江水利委员会的专题报告。与会专家认为两个方案均是可行的，但绝大多数专家倾向选用钢衬钢筋混凝土联合受力方案。其理由是：①钢衬较薄，有利于保证钢材材质和焊接质量，只要认真浇好外包钢筋混凝土，可以保证钢衬和钢筋混凝土联合受力，因而安全度要比明管方案较高；②可立足于采用国内钢材，受国外条件的制约小，投资也小；③前苏联对钢衬钢筋混凝土联合受力技术已有丰富的经验，可资借鉴，我国近年来也建成了一些钢衬钢筋混凝土管道，有一定的设计、施工经验和科研成果可供应用。

专家会议要求：①进一步收集和借鉴国内外经验，继续进行科研和试验；②论证钢衬和钢筋混凝土结构在整体或单独受力状况下的设计准则；③为保证有较大的安全度，钢衬和钢筋混凝土各自单独承受全部内水压力工况下的安全系数宜大于 1。

## 二、技术设计审查阶段安排的科学研究和试验

根据设计的需要，三峡总公司技术委员会安排了 7 项科学研究和试验，其中包括：

- （1）结构仿真计算，由中国水利水电科学研究院董哲仁和浙江大学钟秉章分别承担。
- （2）坝内埋管段结构分析与大比尺仿真材料结构模型试验，主要由武汉水利电力大学马善定承担，清华大学陈敏中完成了三维有限元分析。
- （3）大比尺平面结构模型试验研究（模拟斜直段断面），由武汉水利电力大学马善定承担。
- （4）上、下弯段大比尺结构模型试验，由广西大学张仲卿承担。
- （5）预应力钢筋混凝土管道结构设计研究，分别由长江水利委员会设计院傅继涛和华北水利水电学院李树瑶承担。
- （6）下平段施工措施研究，由葛洲坝集团公司傅华承担。

1996 年 11 月三峡总公司技术委员会组织专家对上述科研和试验成果进行了评审，认为：“安排上述科研项目是十分必要的，各承担单位积极努力，认真负责，取得了丰硕的成果，使我国水利水电科技界在这方面的科研水平上了一个台阶，为三峡工程压力管道技术设计质量的提高提供了条件”。

## 三、科学研究和试验的主要成果

### （一）钢衬钢筋混凝土压力管道结构仿真计算

（1）水科院董哲仁等人所作的结构仿真计算比较全面、系统，对三峡工程和其它水利水电工程压力管道的设计均有参考价值。其主要成果为五部分：①采用三维线性有限元

方法,对压力管道和大坝整体结构,进行了常规荷载作用下应力状态的分析计算;②进行了施工期温度场和运行期准稳定温度场的仿真计算,计算出管壁混凝土不开裂状态下,压力管道中的最大温度徐变应力和应力分布;③开发了钢筋混凝土非线性有限元分析 SNAP 程序和数学模型,对三峡压力管道进行了全过程分析, $P < 0.46\text{MPa}$  时,外包混凝土处于弹性工作状态, $0.47\text{MPa} < P < 0.76\text{MPa}$  时,混凝土开裂形成贯穿性裂缝, $P = 3.2\text{MPa} \sim 3.6\text{MPa}$  时,钢衬及钢筋发生屈服;④开发了混凝土正交异性准解析模型 SAPDF 用于钢衬钢筋混凝土压力管道计算,并对三峡压力管道进行了全过程分析,其计算结果可与 SNAP 程序的计算结果互相检验;⑤提出了钢衬钢筋混凝土压力管道混凝土裂缝宽度计算方法,这种方法不同于一般的钢筋混凝土构件的先计算应变、再计算裂缝宽度的方法,而是先计算结构的位移,再算出裂缝的条数,再求出平均缝宽。据此法计算,预测三峡管道中平均缝宽为  $0.41\text{mm}$ ,最大缝宽为  $0.53\text{mm}$ 。

(2) 浙江大学钟秉章等人所作的结构仿真计算数学模型合理,所采用的非线性有限元方法考虑了混凝土的软化特性,成果比较可信。其主要成果为两部分:①建立了弹塑性有限元的数学模型,对管坝间设与不设垫层的两种形式的压力管道结构的应力与应变进行了计算。对三峡工程压力管道的全过程分析表明,当管坝间无垫层, $P < 0.48\text{MPa}$  时,管道结构处于弹性工作状态; $0.48\text{MPa} < P < 1.21\text{MPa}$  时,管道结构处于弹塑性状态;其中当  $P = 0.97\text{MPa}$  时,混凝土开始开裂,为初裂荷载;当  $1.21\text{MPa} < P < 1.81\text{MPa}$  时,结构处于超载状态,加垫层对钢管和钢筋的应力影响不大。②配合武汉水利电力大学大比尺平面模型试验作非线性有限元计算,其成果与模型试验成果相比,两者在应力分布、变形规律、初裂荷载、初裂发生部位、塑性软化开裂区发展规律等较为接近,计算成果和试验结果可相互印证。

## (二) 坝内埋管段结构分析与大比尺仿真材料结构模型试验

本项目共提供了以下四项成果:

(1) 三维有限元分析。采用 ALGOR FEAS 大型结构应力计算程序对厂房坝段坝内埋管段作了三维有限元应力分析,对五个断面计算了四种工况的应力,成果较为合理,并为第(2)、(3)、(4)项的工作提供了可靠的边界条件。

(2) 平面非线性分析。采用专为钢衬钢筋混凝土管道非线性分析编制的 NPA 程序,对坝内埋管段的四个断面共进行了 12 个方案的计算分析,以研究不同管顶混凝土厚度、配筋以及超载方式下混凝土开裂与否对管道结构强度和应力分析规律的影响。计算中考虑了混凝土的受拉软化等特性。计算假定和边界条件较合理,计算了内水压力、坝体荷载和运行期温度荷载,成果合理,对设计具有很好的参考价值。

(3) 小比尺模型试验。进行了六个 1:31 的小比尺模型试验,模拟不同的管顶混凝土厚度和不同的配筋,在坝体荷载和内水压力作用下的强度、极限承载力和破坏形态。试验成果表明,管顶混凝土厚度超过  $1/2$  倍管径,抗裂超载安全系数均在 3 以上;不论采用三层或两层钢筋,其钢衬应力、钢筋应力、混凝土应变、初裂荷载、初裂位置以及最后的裂缝条数,两者差别都不大;坝内埋管段与上弯段相交处,混凝土抗裂超载系数很低,仅为 1.0 左右,要采取结构加强措施。

(4) 大比尺模型试验。采用 1:5 的大比尺,对于坝内埋管结构模型试验,无论是在大

比尺上,还是模型尺寸上,迄今在国内外本模型是最大的。除了内水压力和坝体荷载以外,还同时施加了运行期的温度荷载,这也是首次。试验结果表明,在设计荷载作用下,钢衬和钢筋应力很低,不大于 40MPa,但混凝土中的拉应力比较大;在坝体荷载和温度荷载下,模型开裂时内水压力超载系数为 3.05,内水压力达到了 2.2MPa,远大于设计内水压力 0.72MPa。因此,只要管顶混凝土厚度大于钢管半径,在设计荷载作用下,混凝土不致开裂。试验所得钢衬、钢筋和混凝土的应力和裂缝分布形式对于设计有很大的参考价值。

### (三) 大比尺平面结构模型试验

模型比尺为 1:2,是同等模型试验中规模最大的。模型材料基本做到仿真,并首次在大比尺模型上进行温度荷载试验。模型主要研究在设计内水压力下,结构的应力分布、承载比、初裂荷载、裂缝宽度、裂缝发展特征、结构的极限承载能力、管道开裂对坝体的影响;研究在温度荷载作用下,钢材的温度应力及对裂缝宽度的影响等。

试验测得管道初裂位置在  $0^\circ$ (或  $180^\circ$ )断面,初裂荷载 0.7MPa;在设计内水压力下,径向裂缝 20 条,实测最大缝宽 0.2mm,估计原型缝宽不会超过 0.3mm;管道在混凝土开裂前,钢材承担内水荷载 25%左右,开裂后,裂缝断面钢材承担全部内水压力;管道实测极限内压荷载为 3.4MPa,为设计内压的 2.81 倍;管壁内外温差时,钢材应力有拉有压,但对结构总体的承载能力影响不大;温度荷载对裂缝宽度增加值不大,内高外低温差  $13^\circ\text{C}$ 时,最大缝宽增加 0.045mm。

上述试验研究成果,对三峡工程钢衬钢筋混凝土联合受力管道在设计内水压力作用下,裂缝处钢材应力、裂缝的间距和缝宽、管道的超载安全系数和极限承载能力等,得到了明确的认识;对适当增加管道外缘布筋以减小裂缝宽度、管道两侧设置软垫层以阻止裂缝向坝体发展、管道底部裂缝不致向坝体延伸等,都得到了验证。模型设计周全,制作和量测工作严谨,试验研究内容完整,成果可信,又作了规律性的探索和提高,对三峡工程和其它工程的钢衬钢筋混凝土管道设计,具有重要的参考价值。

### (四) 上、下弯段大比尺结构模型试验

(1) 上弯段试验。比尺采用 1:9.3,试验研究内容为:①在坝体应力和内水压力作用下,钢衬、钢筋和混凝土的应力分布和承载比;②管道出坝体处应力集中程度,对管道安全度的影响;③管道与预留槽底的连接形式和加固措施;④管道初裂荷载和破坏特征;⑤温度升降对钢衬、钢筋和混凝土的应力场。

试验结果表明:当内水压力到达设计荷载即 0.90MPa 时,外包混凝土部分测点已屈服;当内水压力为 1.10MPa 时,管项出现第一条裂缝,缝宽 0.37mm,故初裂荷载应为 0.90MPa;当内水压力为 2.40MPa 时,钢衬、钢筋均屈服,相当于超载安全系数为 2.67;此时背管上半圆裂缝 11 条,平均缝宽 0.40mm;在内水压力 0.90MPa 时,浅槽弯段法向拉力 63 500kN,需按此设计锚筋;量测了温升、温降  $10^\circ\text{C}$ 时,钢衬与钢筋的应力,表明温度荷载在结构应力中所占的比例相当大。

(2) 下弯段试验。比尺采用 1:9.0,试验研究内容为:①在坝体应力和水压力作用下,钢衬、钢筋和混凝土的应力分布和承载比;②浅槽管坝连接部位的应力分布规律及破坏特征;③管道混凝土的初裂荷载、裂缝开展规律及缝宽;④温升温降时管道的温度场和温度应力场;⑤管道承载能力及破坏特征。

试验成果表明:管道承受内水压力 0.70MPa 时,混凝土呈现塑性性质,钢衬应力迅速上升,为初裂荷载;当内水压力为 1.10MPa 时,混凝土有贯穿性裂缝;管道承受设计内水压力 1.40MPa 时,钢衬和钢筋应力仅达到屈服强度的 1/3 左右;钢衬和钢筋在内水压力为 3.40MPa 时开始屈服,超载安全系数 2.43。

#### (五) 预应力钢筋混凝土管道结构设计研究

(1) 长江水利委员会设计院研究的预应力钢筋混凝土管道结构:外包混凝土厚 1.5m,混凝土标号 350<sup>#</sup>;钢衬厚度主要根据防渗要求,不参与承载,选用 16Mn 钢板,厚度 20mm;预应力采用 QM 预锚系统,在管腰分设两个扶壁,锚索分为上、下两支,单支包角约 180°,每支分为并列的两束,采用 QM15-12 锚具,锚索由 12 根 7 $\phi$ 5mm 钢绞线编束而成,锚索间距,自上弯段至下弯段分别为 400mm 和 230mm。与钢衬钢筋混凝土管道比较,认为预应力混凝土管道潜在安全度大一些,结构耐久性强,造价相当,施工上由于钢衬、钢筋量减少,保证了外包混凝土浇筑质量和工期,预应力施工可在混凝土浇筑后进行,不占直线工期。

(2) 华北水利水电学院研究的预应力钢筋混凝土管道结构:外包混凝土厚 2m,混凝土标号 400<sup>#</sup>,钢衬厚度 28mm~36mm,预应力锚束包角 360°,采用三个外扶壁(或外槽口)方案,采用钢衬-预应力混凝土联合受力方案,在设计条件下,结构承载安全系数由 2.3~2.5(钢衬钢筋混凝土联合受力方案)提高至 2.9~3.1。造价需提高约 10%。

#### (六) 下平段施工措施研究

选择清江隔河岩水电站 4<sup>#</sup>机压力钢管下平段,混凝土施工埋设了测缝计、温度计和钢筋计。从测缝计看,钢管与混凝土之间是结合紧密的,缝的开度为 0~0.5mm 之间,有小缝也是互相不串通的。说明只要采取措施,下平段混凝土可以与钢管结合好。

## 四、向俄罗斯咨询及考察

### (一) 俄罗斯专家咨询

1997 年 5 月三峡总公司邀请了三位俄罗斯专家对三峡水电站钢衬钢筋混凝土联合受力管道的施工技术进行了咨询,提出了以下主要意见:

(1) 关于压力管道结构设计优化。三峡水电站钢衬钢筋混凝土压力管道在设计内水压力作用下,允许外包混凝土出现贯穿性裂缝,全部内水压力由钢衬和钢筋共同承担,总的安全系数大于 2.2;钢衬和钢筋各自单独承担全部内水压力时,要求安全系数均大于 1.0;目前设计配筋  $\phi 40\text{mm}@200\text{mm}$  左右,在上弯段和斜直段为四层,在下弯段为五层。

据俄专家介绍,前苏联 80 年代已建工程如萨扬舒申斯克采用钢衬钢筋混凝土压力管道,总的安全系数取为 1.8~2.0,但目前俄罗斯设计规范已作进一步降低;从原型观测分析,这种结构具有相当大的安全储备;为此建议长江水利委员会根据俄罗斯规范研究适当降低结构的安全系数,选用强度更高的钢板和钢筋,减少环筋层数,并结合施工方法研究取消钢管加劲环,以方便施工。

(2) 施工方法和施工设备。建议将外包混凝土钢筋制作成钢筋框,并将环筋在加工厂螺旋形绕在钢衬外侧,形成安装节,整体运到坝面安装,这样不仅能保证钢衬和钢筋的焊接质量,同时又可取消加劲环和内支撑,尽量减少焊接工作量,有利于现场施工。俄专

家书面建议了工艺流程、场地布置和施工设备。

(3) 关于厂坝间的伸缩节。长江水利委员会在厂坝连接部位设计了曾用在苏联札戈尔蓄能电站管道间的内接式伸缩节。据俄专家意见,内接式伸缩节不适用于三峡工程。前苏联萨扬舒申斯克和契尔盖两个水电站均为高拱坝,气候条件远比三峡工程恶劣,已不设伸缩节。三峡压力钢管的直径达 12.4m,伸缩节的制作、安装和维护都存在一定的困难。从厂坝连接部位位移的初步计算结果看,左岸厂房 1<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>机组可以取消伸缩节,7<sup>#</sup>~14<sup>#</sup>机组应进一步论证取消伸缩节的可能性,同时研究适用于三峡工程的伸缩节形式。

## (二) 赴俄罗斯考察

1997年9月三峡总公司、长江水利委员会和武汉水利电力大学组团去俄罗斯考察钢衬钢筋混凝土压力钢管的设计和施工技术。考察团访问了设计、科研单位和三个水电站(札戈尔斯克、克拉斯诺雅尔斯克和萨扬舒申斯克)。考察的主要技术问题如下:

(1) 钢衬钢筋混凝土压力管道。参观的三个水电站和了解到其它两个水电站的钢衬钢筋混凝土压力管道的基本情况见表 1。

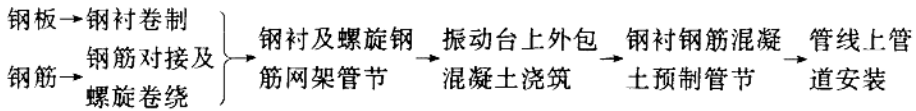
表 1 钢衬钢筋混凝土压力管道基本情况表

工 程	克拉斯诺雅尔斯克	萨扬舒申斯克	札戈尔	契尔盖	洋 雅
坝 型	重力坝	重力拱坝	土坝	拱 坝	支墩坝
坝高(m)	125	245	60	233	115
水头(m)	112	226	170	129	100
直径(m)	7.50	7.50	7.50	5.50	7.80
钢管壁厚(mm)	32~40	16~30	10	20	14~16
外包混凝土厚(m)	1.50(六边形)	1.50	0.40	1.50(六边形)	3.00
第一层环向钢筋(mm)	4φ50	4φ70	10φ40	3φ50	5φ40
第二层环筋(mm)	4φ45	4φ60	10φ40	3φ40	5φ40
第三层环筋(mm)				3φ28	5φ40
第一层纵筋(mm)	4φ25	4φ50	φ25	4φ25	4φ25
第二层纵筋(mm)	4φ45	4φ28	φ25	4φ25	4φ28
第三层纵筋(mm)				4φ25	4φ50~25

克拉斯诺雅尔斯克已运行 40 年,萨扬舒申斯克已运行 19 年,札戈尔已运行 12 年。运行以来,裂缝无变化,认为没有什么问题。这些电站气候条件较为恶劣,最低气温达 -38℃,而最高气温为 36℃。裂缝间距约为 0.4m~0.8m,裂缝宽度一般在 0.3mm 以下,个别的约 0.5mm。有些裂缝处有白色的游离钙泌出,俄方认为对运行无影响。对于管道混凝土的厚度,认为主要取决于两个因素:一是保温,使管道内的水在冬季不结冰;二是考虑便于施工,外包混凝土的配筋有配置二排或三排的,有配置 II 级钢筋,也有配置 III 级钢筋。配置的钢筋量有的相当于全部受力用钢量的一半,如萨扬舒申斯克,也有的按全部内水压力由钢筋承担配筋,钢衬只作为防渗,如札戈尔。钢衬外一般不设加劲环,但在弯管

和叉管段设加劲环。

(2) 关于札戈尔电站钢衬钢筋混凝土预制管制造工艺。钢衬内径 7.5m, 厚度 10mm~20mm, 以屈服强度为 320MPa 的钢板卷制而成。钢衬外有两层  $\Phi 40\text{mm}$  环筋, 由屈服强度 350MPa 的螺纹钢筋连续卷制于钢衬外面。压力管道的施工工艺流程如下:



上述工艺流程,有可能为三峡工程借鉴的是钢筋的连续对接(焊接)及其在钢衬管外部的连续螺旋绕制。

(3) 关于厂坝间压力管道伸缩节。参观的克拉斯诺雅尔斯克、萨扬舒申斯克水电站,据了解其它如恰尔盖水电站,厂坝间压力管道均未设置伸缩节。上述工程均已运行几十年,未发现管道有异常情况。

取消伸缩节后,设置一段补偿节,将钢管外包垫层与混凝土分开。在萨扬舒申斯克补偿节管段长 7m, 钢板厚 40mm, 钢号 EZ138, 沿 360°全包厚 20mm 毛毡。垫层管的长度由计算确定。俄方对取消伸缩节、设置补偿节有一套计算程序,并与原型观测验证,成果吻合较好。

## 五、结 语

(1) 三峡工程水电站引水压力管道直径大、水头高、 $HD$  值大,为当今世界之首。在国家“七五”、“八五”科研攻关成果基础上,选择了钢衬钢筋混凝土联合受力背管形式,管道整体安全度较高,材料可以立足国内,投资较省。

(2) 在技术设计审查阶段又进行了大量的科学试验研究,取得了丰硕的成果。摸清了在设计荷载下钢衬、钢筋和混凝土受力状态,裂缝开展特性,温度应力和结构超载安全度。满足了三峡工程需要,对其它类似工程有参考价值。

(3) 通过向俄罗斯咨询和考察,认为管道结构设计尚需优化,减少配筋层数,以利施工;厂坝间伸缩节有取消的可能性;施工方法和设备需进一步落实,以保证管道施工质量和一年完成四条管道的施工强度。

# 水电站压力管道的应用、发展与研究

刘 宪 亮

(华北水利水电学院, 郑州 450045)

**提 要** 本文论述了水电站压力管道的工程应用情况、发展过程及研究现状,介绍了加劲压力钢管的工程应用、研究现状及工程设计中存在的问题和最新研究成果。

**关键词** 水电站 压力管道 加劲环

## 一、水电站压力管道的发展趋势

能源是人类社会发展的重要物质基础,水力发电是人类获得能源动力的一个重要途径。水资源是一种再生型资源,所以水力发电具有成本低、效率高、运行灵活、不污染环境等优点<sup>[1~3]</sup>。为了改善和调整能源结构<sup>[4]</sup>,充分利用水电的优势,世界各国水力发电事业均有迅猛发展之势。随着国内外大型常规和抽水蓄能水电站的兴建,水电站压力管道的  $HD$  值急剧增长,压力管道日趋向巨型( $HD > 1\ 200\text{m}\cdot\text{m}$ )和超巨型( $HD > 3\ 000\text{m}\cdot\text{m}$ )化发展(表 1)。据统计,世界上已建的巨型压力管道达 90 余座,我国约占 10 座<sup>[5]</sup>。这标志着我国水力发电事业已向世界水平发展。应该承认,大中型压力管道的设计与施工等我国已积累了丰富的成功建设经验。但也不能否认,我们在巨型压力管道建设方面还存在不足,如巨型压力管道在规模尺寸、结构新颖性、结构分析方法等诸多方面,已远远超出我国现行压力钢管设计规范<sup>[6]</sup>的规定;国产的高强度低合金调质钢还不能完全满足巨型压力管道的需要;厚壁钢管的焊接、制造和安装等技术水平与世界先进水平相比还有一定的差距。这就意味着有许多亟待解决的新课题<sup>[5~7]</sup>,诸如巨型压力管道的新型结构的开发与应用、设计理论和方法、施工技术工艺、质量控制与检测及运行管理等,急需我国科技工作者和工程师们进行攻关研究和开发。

## 二、水电站压力管道的应用与发展

压力管道的发展,与社会生产力及科学技术的发展水平是相应的,同样经历着由小型到大型、由简单到复杂的历史过程。按布置形式、结构特征和受力特点,水电站压力管道可分为三大类:露天钢管、埋藏管和坝面管。

### (一) 露天式压力钢管

露天钢管是最原始、最典型、最基本的水电站压力引水管道。由于明管具有维护检查方便、受力明确、结构分析成果可信、不易发生外压失稳事故、经济安全等优点,所以明管倍受青睐,得到广泛应用<sup>[8~10]</sup>。早期水电站规模较小,同时由于钢板连结工艺和方法



(铆接)的局限性,明管仅用于小型的压力管道。1925年初,世界上电弧焊的发明,使钢板高质量焊接得以实现,这次钢结构的大革命,促进了高HD压力钢管的蓬勃发展<sup>[11]</sup>,如30年代法国的奥流水电站(水头980m,管壁厚45mm),英国的胡佛坝水电站(管径9m,管壁厚70mm)。随后建设的超巨型压力管道有意大利的赛·费奥拉那水电站(HD=3266m·m),奥地利的罗达乌水电站(HD=3173m·m)和法国的拉科西水电站(HD=3048m·m),这些水电站压力管道均采用明压力钢管。

表1 国内外压力钢管水平比较表

序	参 数	中 国			国 外			
		数 值	电站名称	日 期	数值	国 别	电站名称	日 期
1	最大管径 (m)	10.80	岩 滩	1989	10.50	巴西/乌拉圭 /美国	伊泰普/古瑞	1983
		10.50	水 口	在建	11.20	泰 国	Chiew-larn	1984
		11.2	五强溪	筹建	11.00	巴基斯坦	塔贝拉	1979
		12.30	山 峡	在建	11.40	委内瑞拉	古里二厂	1982
				12.20	美 国	大古力三厂	1977	
2	最大水头 (m)	1 074	天 湖	已建	1 750	瑞 士	山多体	已建(明箍)
		840.5	羊卓雍湖	筹建	1 675	意大利	塞·费奥拉那	已建(蓄能)
		910 ~1 100	雾灵山	蓄能待建	1 480	秘 鲁	古英戈	已建
					1 440	法 国	卡卜-德龙	已建(明箍)
3	最大 (H×D)	2 552	台湾明湖	1984	5 843	英 国	底诺维克	已建
		1 824	已礼河3级	1966	5 376	日 本	imaichi	1984
		5 810	天荒坪	蓄能初设	4 840	法 国	罗斯兰	已建
4	最大 (H×D <sup>2</sup> )	14 802	台湾明湖	1984	55 503	英 国	底诺维克	已建
		9 090	鲁布格	1987	33 406	日 本	imaichi	1984
					30 960	日 本	新丰根	1972
5	最大壁厚 (mm)	46	以礼河三级	1966	75	日 本	奥清津	1976
		46	隔河岩	在建	70	美 国	胡佛/鲍尔德	已建
		42	鲁布格	1987	65	巴西/乌拉圭	伊泰普	1983
		54	三 峡	待建	64	奥地利	罗达乌	已建
					61	日 本	SHIMOGO	1982
6	最大长度 (m)	3 530	天生桥二级	在建	3 377	日 本	NAGAWATSU	1943
		2×3 563.5	羊卓雍湖	筹建	2 447	美 国	卡斯泰克	1971
6	最大重量 (t)	9 020	台湾明湖	1984	28 076	前苏联	萨扬舒申斯克	1978
		17 000	天生桥二级	在建	23 400	前苏联	克拉斯诺雅尔斯克	1973
		60 000	三 峡	待建	20 300	前苏联	乌斯奇、伊里姆	已建