

加劲压力钢管变形后 加固方案设计与分析

马文亮 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

加劲压力钢管变形后 加固方案设计与分析

马文亮 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书共分为 10 章,以 YMD 水电站压力钢管为例,介绍了水电站压力钢管的发展与研究概况;阐述了压力钢管加固方案,建立了压力钢管加固方案的有限元模型;从应力分析、变形分析和极限承载力分析等方面对压力钢管加固方案进行了比选和优化;在计算模型中引入初始缺陷及应力场,绘制荷载-位移曲线,确定各个压力钢管加固方案的极限承载力;并对各个加固方案的极限承载力进行对比分析,确定最优加固方案。研究内容采用图表等形式表达,丰富易懂,研究成果为埋藏式加劲压力钢管结构的设计和施工提供了一定的参考依据。

本书可为水工结构工程领域工程师、设计人员、施工技术人员和研究人員提供参考,也可供大中专院校水利工程相关专业师生学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

加劲压力钢管变形后加固方案设计与分析 / 马文亮
著. — 北京:中国水利水电出版社, 2016.8
ISBN 978-7-5170-4715-5

I. ①加… II. ①马… III. ①水力发电站—压力钢管
—加固—研究 IV. ①TV732

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第209867号

书 名	加劲压力钢管变形后加固方案设计与分析 JIAJIN YALI GANGGUAN BIANXINGHOU JIAGU FANG'AN SHE- JI YU FENXI
作 者	马文亮 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 9.75 印张 231 千字
版 次	2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷
定 价	45.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

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的一个重要途径。水资源是一种可再生资源，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。为了改善和调整能源结构，充分利用水电资源，我国的水力发电事业得到了迅猛发展。

水电站压力钢管是水力发电系统的重要结构，特别是埋藏式压力钢管，其外压稳定性问题比较突出，压力钢管承受的外压主要有：第一，地下水压力，钢衬所受的地下水压力值，可根据勘测资料选定，根据最高地下水位线来确定外水压力，同时要分析水库蓄水和引水系统渗漏等因素对地下水位的影响；第二，混凝土与钢衬之间的接触灌浆压力，为了保证钢衬与混凝土垫层接合紧密并减少缝隙，在钢衬装好且回填混凝土垫层后，要进行接触灌浆，在灌浆时，因灌浆压力直接作用在钢衬外部，如果不按规程进行灌浆，或对压力控制不当，很容易造成钢管失稳破坏；第三，浇筑混凝土垫层时的临时外荷载，钢衬安装好后，浇筑混凝土垫层时，流态混凝土对钢衬产生外压力；第四，机组关闭时所产生的外压，当水电站机组关闭时，对压力钢管会产生负压，该外压最大值相当于1个标准大气压（101325Pa）。钢管一旦发生失稳破坏，不仅额外增加了修复所需的费用，而且使水电站停止运行，在经济上造成严重损失。因此，开展压力钢管的抗外压失稳屈曲破坏机理分析，为压力钢管的稳定计算及设计提供一套行之有效的办法，有着重要的理论价值和工程实际意义。

本书以YMD水电站压力钢管为例，阐述了压力钢管加固方案，建立了压力钢管加固方案分析的有限元模型，对压力钢管加固方案进行了比选和优化，并对各个加固方案进行了极限承载力分析。本书作者为华北水利水电大学马文亮老师。本书在成稿过程中得到了中水北方勘测设计研究有限责任公司、华北水利水电大学刘东常教授的大力支持与帮助，在此一并表示诚挚的谢意。

限于作者水平，书中内容难免有疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作者

2016年7月

目 录 /

前言

第 1 章 水电站压力钢管概述	1
1.1 水电站压力钢管的发展与研究概况	1
1.1.1 水电站压力钢管建设发展概况	1
1.1.2 水电站压力钢管的研究概况	1
1.2 压力钢管的抗外压承载力问题	3
1.2.1 压力钢管常见的几种外压	3
1.2.2 压力钢管抗外压稳定问题	4
第 2 章 研究对象及工程概况	6
2.1 工程概况	6
2.2 压力钢管的布置	6
2.3 压力钢管加固方案	8
2.3.1 加劲环加固方案	8
2.3.2 内衬钢管加固方案	8
2.3.3 重新更换压力钢管方案	8
2.4 计算荷载	9
2.5 稳定安全系数及计算公式	10
2.6 材料性能参数	11
第 3 章 压力钢管加固方案分析有限元模型	12
3.1 有限元法非线性分析基本原理	12
3.2 加劲环加固方案有限元模型	12
3.3 内衬钢管加固方案有限元模型	13
3.4 模型模拟范围	13
3.5 单元选用	14
3.6 钢材本构模型	16
3.7 模型边界条件	17

3.8 计算内容	17
第4章 压力钢管加固方案比选	19
4.1 压力钢管目前现状应力及变形分析	19
4.1.1 应力分析	19
4.1.2 变形分析	21
4.2 加劲环加固方案极限承载力分析	21
4.2.1 极限承载力分析	22
4.2.2 应力分析	23
4.2.3 变形分析	24
4.3 内衬钢管加固方案极限承载力分析	25
4.3.1 极限承载力分析	25
4.3.2 应力分析	25
4.3.3 变形分析	27
4.4 压力钢管加固方案比选	27
第5章 压力钢管加固方案优化研究	28
5.1 原混凝土垫板上加劲环加固方案分析	28
5.1.1 极限承载力分析	28
5.1.2 应力分析	28
5.1.3 变形分析	29
5.2 新混凝土垫板上加劲环加固方案分析	29
5.2.1 极限承载力分析	29
5.2.2 应力分析	30
5.2.3 变形分析	31
5.3 压力钢管加固方案优化	32
第6章 新混凝土垫板上加劲环加固方案极限承载力分析	33
6.1 在现状变形基础上加固后压力钢管分析	33
6.1.1 引入初始缺陷及应力场	33
6.1.2 绘制荷载-位移曲线	33
6.1.3 极限承载力分析	33
6.1.4 分析路径及内容	34
6.1.5 应力分析	34
6.1.6 变形分析	43
6.2 在开挖回弹基础上加固后压力钢管分析	51
6.2.1 压力钢管开挖回弹后残余应力及变形分析	51

6.2.2	引入初始缺陷及应力场	53
6.2.3	绘制荷载-位移曲线	54
6.2.4	极限承载力分析	55
6.2.5	分析路径及内容	55
6.2.6	应力分析	55
6.2.7	变形分析	65
6.3	两种计算模型分析结果对比	73
第7章	新混凝土垫板上加劲环及底部内衬钢管加固方案极限承载力分析	75
7.1	在现状变形基础上加固后压力钢管分析	75
7.1.1	引入初始缺陷及应力场	75
7.1.2	绘制荷载-位移曲线	75
7.1.3	极限承载力分析	76
7.1.4	分析路径及内容	76
7.1.5	应力分析	77
7.1.6	变形分析	86
7.2	在开挖回弹基础上加固后压力钢管分析	95
7.2.1	引入初始缺陷及应力场	95
7.2.2	绘制荷载-位移曲线	95
7.2.3	极限承载力分析	95
7.2.4	分析路径及内容	96
7.2.5	应力分析	97
7.2.6	变形分析	106
7.3	两种计算模型分析结果对比	115
第8章	原混凝土垫板上闭合加劲环加固方案极限承载力分析	116
8.1	考虑原始加劲环的压力钢管分析	116
8.1.1	引入初始缺陷及应力场	116
8.1.2	绘制荷载-位移曲线	116
8.1.3	极限承载力分析	117
8.1.4	分析内容	118
8.1.5	应力分析	118
8.1.6	变形分析	121
8.2	不考虑原始加劲环的压力钢管分析	124
8.2.1	引入初始缺陷及应力场	124
8.2.2	绘制荷载-位移曲线	125

8.2.3	极限承载力分析	125
8.2.4	应力分析	126
8.2.5	变形分析	127
第9章	新加劲环式压力钢管设计方案极限承载力分析	129
9.1	不考虑内水压力的压力钢管分析	129
9.1.1	压力钢管结构设计	129
9.1.2	绘制荷载-位移曲线	129
9.1.3	极限承载力分析	130
9.1.4	分析内容	130
9.1.5	应力分析	131
9.1.6	变形分析	134
9.2	考虑内水压力的压力钢管分析	137
9.2.1	压力钢管结构设计	137
9.2.2	绘制荷载-位移曲线	137
9.2.3	极限承载力分析	137
9.2.4	应力分析	138
9.2.5	变形分析	139
第10章	结论与建议	141
10.1	主要结论	141
10.1.1	压力钢管加固方案比选	141
10.1.2	压力钢管加固方案优化	141
10.1.3	混凝土垫板对承载力的影响	141
10.1.4	压力钢管加固方案的选择	141
10.1.5	新加劲环式压力钢管设计方案	142
10.2	几点建议	142
10.2.1	压力钢管圆度恢复	142
10.2.2	加大混凝土垫板包角	143
10.2.3	压力钢管施工要求	143
参考文献		144

第 1 章 水电站压力钢管概述

1.1 水电站压力钢管的发展与研究概况

1.1.1 水电站压力钢管建设发展概况

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的一个重要途径。水资源是一种可再生资源,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^[1~3]。为了改善和调整能源结构^[4],充分利用水电资源,我国的水力发电事业得到了迅猛发展。但是和世界先进水平相比,我国在巨型压力钢管的研究和应用上还有较大差距。如巨型压力钢管在规模、尺寸、结构分析方法等方面,已经远远超过了我国水电站压力钢管设计规范的规定;国产高强度低合金钢还不能完全满足巨型压力钢管的需要;厚壁钢管的焊接、制造和安装等技术问题和世界先进水平还存在很大的差距。这些给我们带来一系列亟待解决的新课题,如巨型压力钢管新型结构的开发和利用、设计理论和方法、施工技术、与工艺、质量控制与检测、运行机理等问题,都需要进行科技攻关研究。

随着大型常规和抽水蓄能电站的兴建,水电站压力钢管的 HD 值急剧增长,压力钢管趋向巨型(HD 值大于 $1200\text{m} \cdot \text{m}$)和超巨型(HD 值大于 $3000\text{m} \cdot \text{m}$)方向发展^[5]。据不完全统计^[6],目前,世界上已建成巨型压力钢管的水电站达 140 余座(我国约 10 余座), HD 值大于 $3000\text{m} \cdot \text{m}$ 达 28 余座, HD 值大于 $4000\text{m} \cdot \text{m}$ 有 10 余座。其中,美国大古力三厂,采用埋藏式钢管,钢管直径达 12.2m ;最大水头 1750m (瑞士山多林水电站);最大 HD 值 $5843\text{m} \cdot \text{m}$ (英国底诺维克水电站);最大管长 3377m (日本 NACA-MATSU 水电站);最大钢管重量 2.8 万 t (苏联萨杨-舒申斯克水电站,其中钢管重 1.2 万 t ,钢筋重 1.6 万 t);最大管壁厚度 75mm (日本澳清津水电站);最大 E-W 型岔管 HD 值为 $5376\text{m} \cdot \text{m}$,其中岔管壁厚 100mm (日本 IMAICH 水电站),最大月牙形肋板厚 189mm (美国卡斯泰水电站);最大球岔 HD 值为 $5831\text{m} \cdot \text{m}$ (日本奥吉野水电站);最大管径为 11.2m ,相应 HD 值为 $1344\text{m} \cdot \text{m}$,梁厚达 100mm (泰国 CHIEW 水电站)。

1.1.2 水电站压力钢管的研究概况

近年来,水电站压力钢管的理论研究和应用研究得到了长足发展。20 世纪 50 年代

以前,由于大量计算工作依赖于手工进行,所以压力钢管结构分析方法和理论仅局限于线弹性范围内的解析法,结构模型仍然采用简化的理想模型。如压力钢管经济直径的计算,只是通过有限的可行性方案进行比较加以确定,或者按照简化的经验公式求得^[7]。20世纪50年代初期,电子计算机的发展与应用使工程力学、结构优化、结构非线性分析、结构动力学计算等理论取得了突破性的进展^[8]。特别是有限单元法的出现^[9],使人们可以采用数值计算方法通过计算机模拟复杂结构的受力状态^[10,11],从此压力钢管的理论研究进入了一个新时期。世界各国在水电站压力钢管结构的应力及强度分析^[12-15]、非线性有限元分析^[16]、温度应力^[17]、优化设计^[18,19]、动力计算^[20,21]、垫层材料研究^[22]、结构模型试验^[23,24]、断裂分析^[25]、弹塑性分析^[26]等方面进行了广泛深入的研究,取得了丰硕的成果。60年代后期,钢衬钢筋混凝土压力管道新型结构的成功应用,给水力发电科技工作者开辟了新的领域^[27-32]。苏联专家通过大比尺模型试验和工程应用经验,向人们证实了钢衬钢筋混凝土压力管道的经济性、合理性、安全性及实用性,并根据其受力特点和工作原理,提出了正交异性多层环的组合结构分析方法和设计理论^[33]。80年代以来,我国武汉大学马善定教授、水利部科技司董哲仁教授、浙江大学钟秉章教授、大连理工大学董毓新教授、路振刚博士、华北水利水电学院刘宪亮博士、中国水利水电科学研究院鲁一暉博士、武汉钢铁设计研究院的赖华金等,在压力管道结构模型的建立与改进、静力非线性有限元分析、外压稳定分析、压力钢管与厂坝联结形式优化、分布裂缝动弹模理论、不均匀水压力影响、动力分析与动力试验、温度应力分析等方面,均取得了开创性的理论成果。这些研究成果为工程设计和施工提供了较强的理论依据,并促进了我国水电站压力钢管的发展和应用。80年代末到90年代初期,华北水利水电学院刘东常教授开创性地运用了半解析有限元法^[34-38]解壳体结构稳定性问题。曾先后开展了预应力U形薄壳渡槽稳定性分析的半解析有限元法的研究、地下埋藏式钢管外压失稳屈曲问题的分析及试验研究等多项工作,为壳体结构稳定性分析和设计的理论研究与应用走出了一条新路。尤其是在研究过程中引入了计算机分析及程序设计手段,大大提高工作效率的同时,研究成果技术含量更高,实用价值更大,开辟了结构稳定性理论分析计算机化的新路。

水电站压力钢管的应用研究主要包括设计理论与方法、结构形式与新型材料的开发、施工工艺与技术等几方面。首先,有关压力钢管的理论研究成果累累,但真正用于工程设计的相对较少。到目前为止,国内外压力钢管的工程设计仍以弹性理论为基础^[39]。我国近几年来有关压力钢管的理论研究取得了很多成果,如浙江大学钟秉章和武汉水利电力大学马善定教授首先提出了埋藏式钢管弹塑性设计原理与方法^[40]。随后马善定教授又针对坝内埋管设计中存在的问题提出了改进意见^[41],并通过模型试验研究了混凝土塑性对坝内埋管承载能力的影响^[42]、软垫层坝内钢管的工作原理、16Mn钢在弹塑性状态下的机械性能及其在埋藏式钢管中的具体应用^[43]等问题,但这种设计理论还没有被工程设计者所接受。董哲仁教授、路振刚博士又先后提出了钢衬钢筋混凝土压力钢管的结构优化设计理论和方法^[44,45],在保证压力钢管运行安全可靠的基础上,能大量节约工程投资,但优化成果在大型压力钢管的设计中仍得不到大胆应用。可以肯定,丰硕的理论研究成果,对压力管道的设计改进和新型结构的合理应用具有一定的指

导意义和促进作用,但理论研究与工程应用不协调的现象仍然存在。这些问题的解决,就要依靠科研工作者和工程设计人员在设计观念上的一致沟通并达成共识。其次,高强度钢材在压力钢管中已得到了广泛的应用。随着大型水电站的不断兴建,压力钢管的HD值日趋增加,为达到减少焊接工程量、加快施工进度、节约工程投资并保证钢管的焊接质量这些目的,采用高强度钢板来减小管壁厚度是最直接有效的方法^[46]。美国、日本、巴西、德国、法国、意大利等国家,高强度低合金调质钢的生产、加工和焊接均有较高的技术水平和成功的工程经验,很多巨型压力钢管采用了80kg级的高强度低合金调质钢,如英国的底诺维克水电站、日本的IMAICHI水电站、法国的罗斯兰水电站等。我国压力钢管用钢,在建国初期多采用普通碳素钢,如A3钢。目前,我国压力钢管所用高强度低合金调质钢仍依赖进口。武钢和鞍钢研制生产了WCF和HQ系列高强钢,但与世界先进水平相比,在技术水平和生产能力方面仍有很大的差距。第三,压力钢管在落料、弯卷、焊接和热处理等施工工艺与技术上发展迅速。纵观国内外钢板落料全貌,由机床剪切向气割、由光电气割向数控气割落料方向发展。弯卷的第一道工序是板头成形,国内外多采用胎模、卷板机和压力机加工。在日本常以1500~1600t的C型单臂压力机进行校正,以保证其圆度。现有国产70mm×3200mm型卷板机,可以卷制40mm×2600mm的高强度低合金调制钢板,仍储备卷板能力。因此,国产卷板机可以满足高强度低合金调制钢巨型压力钢管弯卷的需要。压力钢管的焊接,国内现状仍以手工焊(SMAW)、埋弧自动焊为主(SAW),采用少量的气体保护焊(GMAW)。国外已广泛应用钨极惰性气体保护焊(TIG)、金属极惰性气体保护焊(MIG)和药芯焊丝保护焊(FCAW)。我国对于埋弧焊技术虽已广泛应用,但仍以实心细丝为主,虽有全位置的自动焊接设备,但仅限于工厂制作加工。对于巨型压力钢管,如采用普碳钢、普低钢,势必增加壁厚和尺寸。这样,不仅增加制安吊运等困难,增加投资,而且由于热轧钢板较厚,其力学性能下降,可能出现材质不均匀性,产生平行于板材轧制方向的层状撕裂(分层)现象。因此,当厚度超过规定标准值时,必须有合理的焊接工艺规程,采用焊前预热,焊后保温热处理,以消除残余应力,防止脆性破坏。

1.2 压力钢管的抗外压承载力问题

1.2.1 压力钢管常见的几种外压

对于埋藏式压力钢管,钢衬所受的外压力主要有^[47]:

(1) 地下水压力。在电站运行期间,当钢管放空时,管壁受到大于设计外压力的外水压力作用,加上钢管外围混凝土浇筑质量不好、钢管椭圆度较大等因素,也往往造成压力钢管失稳破坏,而且失稳的范围一般比灌浆压力引起的范围大得多,后果也更为严重。钢衬所受的地下水压力值,可根据勘测资料选定,根据最高地下水位线来确定外水压力是稳妥的,但常会使设计值过高。同时要分析水库蓄水和引水系统渗漏等因素对地下水位的影

响。如果地下水位过高,则应考虑降低地下水位措施(如设排水廊道等),按降低后的地下水位作为钢衬的外水压力。对所设排水措施,如有可能堵塞,则应根据堵塞和通气孔失灵程度,决定校核外水压力值。

(2) 混凝土与钢衬之间的接触灌浆压力。为了保证钢衬与混凝土垫层接合紧密并减少缝隙,在钢衬装好且回填混凝土垫层后,要进行接触灌浆。在灌浆时,因灌浆压力直接作用在钢衬外部,如果不按规程进行灌浆,或对压力控制不当,很容易造成钢管失稳破坏。因此,灌浆时应采取在管内加临时支撑或控制压力的办法防止失稳。否则,需要按照钢衬稳定条件控制灌浆压力。灌浆压力一般为 $0.35 \sim 0.50 \text{ MPa}$,对此压力分布规律近似为均布,作为钢衬校核稳定的外荷载。

(3) 浇筑混凝土垫层时的临时外荷载。钢衬安装好后,浇筑混凝土垫层时,流态混凝土对钢衬产生外压力,如果钢衬内部不加支撑,则必须根据钢衬稳定条件,决定一次浇筑的高度。

(4) 机组关闭时所产生的外压。当水电站机组关闭时,对压力钢管会产生负压,该外压最大值相当于1个标准大气压(atm)^①。

1.2.2 压力钢管抗外压稳定问题

水电站压力钢管是一种壳体结构,其稳定性问题非常突出。当压力钢管在机组负荷变化过程中产生负水锤使管道内产生负压,或者在钢管放空时由于通气孔失灵而产生真空,或者在施工过程中混凝土与钢衬之间产生接触灌浆压力等情况时,压力钢管就容易发生受压屈曲破坏,从而产生外压失稳问题。

在工程实际中,国内外水电站压力钢管发生破坏事故,多为外压作用下的失稳屈曲问题。如我国湖南镇水电站压力钢管发生的灌浆失稳;黄龙滩水电站引水钢管发生的局部失稳。云南绿水河水电站,在1970年10月灌浆时1号斜井钢管发生屈曲,波及范围达181m;1971年8月在第二次充水实验后3号平洞发生钢衬失稳,破坏长度达101m。1974年3月,广东省泉水水电站钢管发生大面积破坏,破坏长度达204m,最大鼓包高达45cm,在整个破坏段中有3个断口。还有我国的云南响水电站、以礼河三级电站等都发生过压力钢管失稳破坏(表1.1)。在国外,世界上最大的抽水蓄能电站——美国的Bath County水电站于1985年投入运行,该电站三个压力隧洞分岔为6条钢管,水头395m,其中一条隧洞第一次充水就出现渗漏,渗透水压压曲折裂了相邻的一条钢管。加拿大的Kemamo、巴西的Nilo-Pecanha等水电站的压力钢管也发生过外压失稳屈曲破坏事故(表1.2)。钢管一旦发生失稳破坏,不仅额外增加了修复所需的费用,而且使水电站停止运行,在经济上造成严重损失。因此,压力钢管的外压稳定性问题应该引起我们的高度重视,开展压力钢管的抗外压失稳屈曲破坏机理分析,为压力钢管的稳定计算及设计提供一套行之有效的方法,有着重要的理论价值和工程实际意义。

① 标准大气压为废除的计量单位,1个标准大气压,即 $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$ 。

表 1.1 国内部分水电站压力钢管外压失稳破坏事例

工程名称	钢管半径 <i>r</i> /mm	钢管壁厚 <i>t</i> /mm	钢材	失稳情况
绿水河 3 号平洞	1200	18	Q345	外水压屈曲，底部有缺陷，砂浆未满
以礼河三级 1 号斜井	1 150	12	Q235	灌浆（钢板有空响）时屈曲，压力曾 达 1.2MPa
泉水下平洞	1200	6	Q235	外水压力屈曲，顶上有小河（鬼坑水）高 出 70m
泉水下弯头	1200	8	Q245	灌浆时测外水压力，堵塞灌浆孔，致使屈曲
下苇甸	2600	16	Q235	岔管前连接段，近腰梁，固结灌浆，邻孔串 浆，操作人员将邻孔堵塞，致使屈曲
云南响水电站	2150	16~26	Q235、Q345	运行一年后，进入钢管检查，发现钢管大范 围破坏，钢管从底部向上突起，从下半圈脱离 外包混凝土后向上凸起，严重变形，横断面变 形呈凸状、双峰状、半台阶状多种形态

表 1.2 国外部分水电站压力钢管外压失稳破坏事例

工程名称	国家	失稳情况	发生年份
芬查	埃塞俄比亚	150m 外水头造成钢管屈曲	1971
格舍拉	芬格兰	直径 1.8~2.4m 钢衬斜井接触灌浆时钢衬屈曲	1954
斯特拉其可拉	加拿大	回填混凝土的钢管在压力波动下屈曲	1958
泰乌姆	美国	5.6m 直径的钢衬，水头 200m，运行 4 年后放水检查时，发现钢衬 屈曲	
尼罗	巴西	斜井钢衬直径 6m，水头 340m，接触灌浆时钢衬发生屈曲	1956

第2章 研究对象及工程概况

2.1 工程概况

YMD水电站压力管线长2006.8m,压力引水管线采用单管、全压力钢管的布置形式。此水电站为明渠引水式电站,水电站设计引用流量 $100\text{m}^3/\text{s}$,安装3台单机容量为44MW的混流式水轮发电机组,总装机容量132MW。本工程规模为中型,工程等别为Ⅲ等,压力管道等主要建筑物级别为3级。工程区地震动峰值加速度为 $0.2g$,相当于Ⅷ度地震基本烈度区,主要建筑物地震设防烈度为Ⅷ度。

水电站于2011年7月8日进入机组有水调试,9月16日完成机组启动验收,11月20日投产发电并进入第一个冬季运行,2012年1月22日因气温骤降渠道冰塞停水发电,2012年4月10日气温回升后电站恢复发电运行,8月1日因渠道原因停机。

2.2 压力钢管的布置

YMD水电站从前池至厂房间布置压力钢管,采用单管单机引水方式,3根压力钢管单管内径4.0m,单根管线全长2015m,3根管线单根长度分别为1771m、1776m、1781m,总长5328m。钢管进口中心高程850.50m,出口中心高程698.00m,单机设计引用流量 $33.33\text{m}^3/\text{s}$,相应管内最大流速 2.65m/s ,根据调保计算结果,管道最大内水压力为 2.27MPa 。钢管随压力变化分段设计,钢管壁厚由12mm增大到36mm,均采用16MnR钢制作,钢管沿线均设置有加劲环,加劲环间距2.0m,采用厚16mm的16MnR钢制作,加劲环高100mm。

钢管沿线每150~200m设置一个镇墩,两个镇墩之间设置伸缩节室,波纹管伸缩节长度1.6m,单管设置12个,3根钢管共设置36个;两个跨断层位置设置长度7.0m波纹管伸缩节,可适应最大的断层错动变形,单管设置2个,3根钢管共设置6个。

钢管内壁喷 $125\mu\text{m}$ 锌;镀层外喷涂一道厚浆型环氧沥青防锈封闭涂料厚度 $125\mu\text{m}$;表面喷涂一道厚浆型环氧沥青防腐涂料面漆厚度 $125\mu\text{m}$ 。外壁喷涂一道厚浆型环氧沥青防锈封闭涂料厚度 $150\mu\text{m}$ 。

压力管线及镇墩主要布置在砂砾石土上,考虑到工程地处环境及冬季运行防冰冻等要

求，压力管道采用浅埋回填管，管底部设置 40cm 厚钢筋混凝土垫板，布置在开挖的沟槽内，管顶平均回填深度 2.0m，回填料为开挖的砂砾石土。

YMD 水电站压力钢管结构布置如图 2.1~图 2.3 所示。

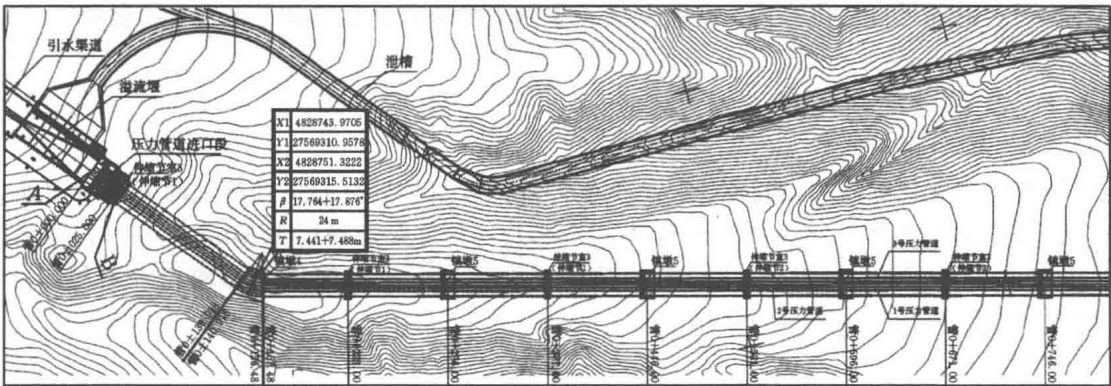


图 2.1 压力管线平面布置图（局部）

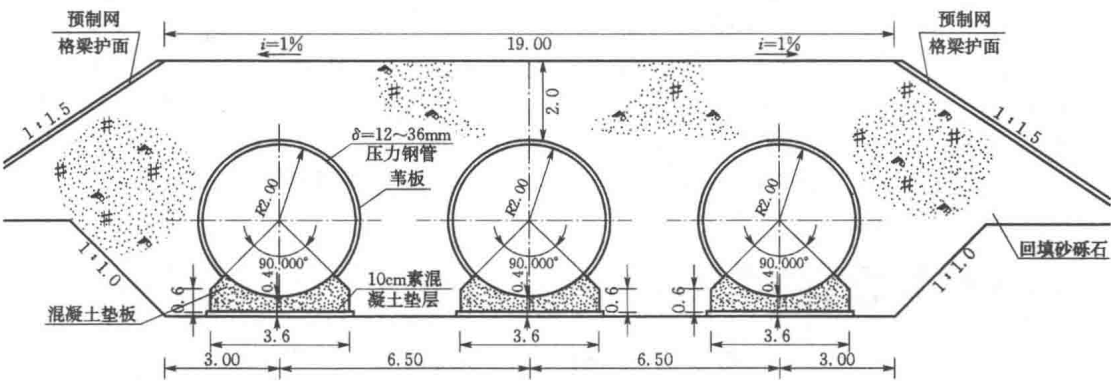


图 2.2 压力管线横剖面图

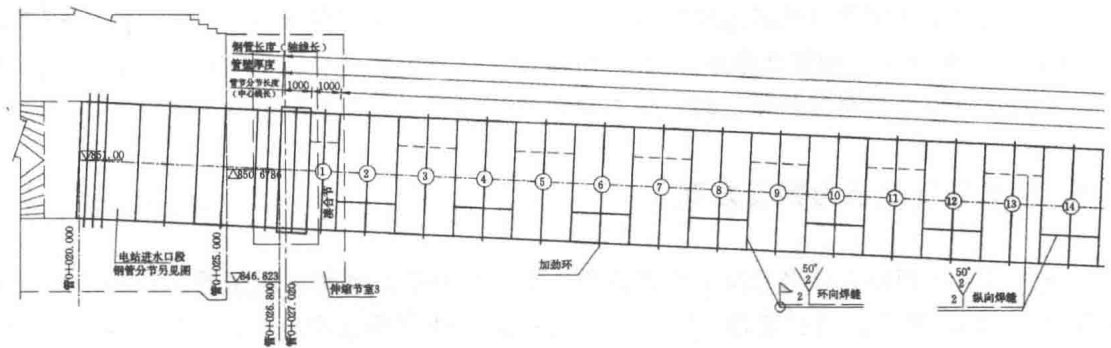


图 2.3 压力钢管分节布置图（局部）

2.3 压力钢管加固方案

本研究对加劲环加固和内衬钢管加固及重新更换压力钢管三种方案进行了研究。

2.3.1 加劲环加固方案

该加固方案挖除压力钢管覆土，在钢管外壁的管节焊缝与原加劲环之间新增一道加劲环，加固范围桩号管 0+029.020~管 0+139.918。新加劲环采用 16MnR 钢制作，加劲环高 200mm，厚 16mm，加劲环在混凝土垫板处断开。压力钢管加劲环加固方案如图 2.4 所示。

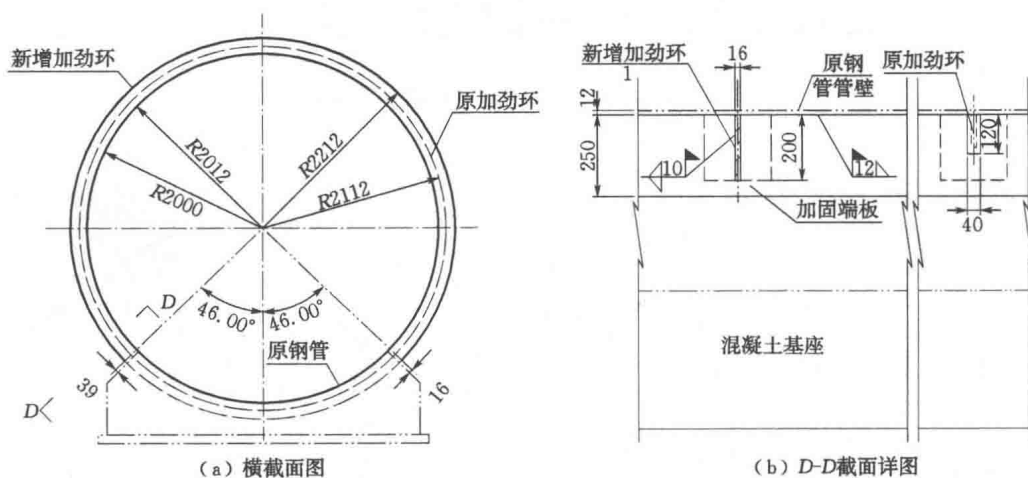


图 2.4 压力钢管加劲环加固方案

2.3.2 内衬钢管加固方案

该加固方案在钢管内部间隔增加内衬钢管环。内衬钢管壁厚 20mm，采用与现状钢管相同的 16MnR 钢板，钢管环顺水流向宽 500mm，按环间距 500mm 布置，内衬钢管环布置在内壁的管节焊缝与原加劲环之间。压力钢管内衬钢管加固方案如图 2.5 所示。

2.3.3 重新更换压力钢管方案

该方案将出现较大变形的压力钢管拆除，重新更换压力钢管。新钢管采用与现状钢管相同的 16MnR 钢板，钢管壁厚 16mm，新钢管加劲环间距 1000mm，加劲环高 200mm，厚 16mm。压力钢管底部采用与原设计方案相同的 40cm 厚钢筋混凝土垫板，布置在开挖的沟槽内，管顶平均回填深度 2.0m，回填料为开挖的砂砾石土。

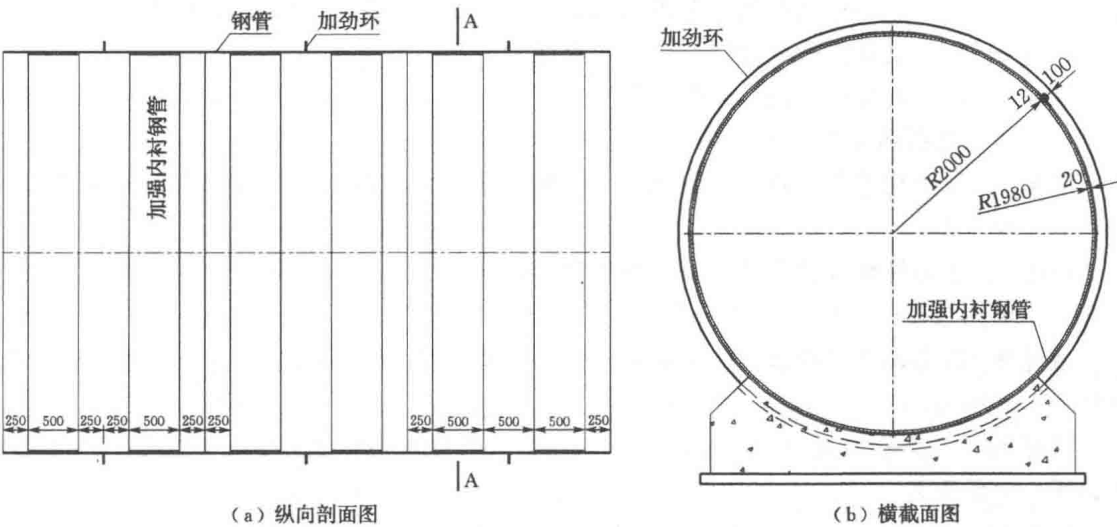


图 2.5 压力钢管内衬钢管加固方案

2.4 计算荷载

YMD 水电站压力钢管采用浅埋回填管，钢管最大内水压力为 2.27MPa，管底部设置 40cm 厚钢筋混凝土垫板，布置在开挖的沟槽内，管顶平均回填深度 2.0m，回填料为开挖的砂砾石土。作用在压力钢管结构上的荷载主要有：

1. 结构自重

压力钢管及加劲环结构自重，自重计算时重力加速度取值为 9.8m/s^2 ，作为体力进行计算。

2. 土压力

压力钢管顶部覆土压力，管顶平均覆土厚度 2.0m，土质为开挖的砂砾石土，土的密度取 $\rho=2000\text{kg/m}^3$ 。

3. 雪荷载

主要考虑压力钢管填土层上的雪荷载，按照《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001) 进行计算，即积雪分布系数乘以相应的基本雪压。

4. 外压力

主要考虑机组关闭时，压力钢管产生的负压力，其值最大可取 1 个标准大气压，即 101 kPa。

在对 YMD 水电站压力钢管结构加固方案进行分析时，主要考虑以下几种计算情况：

- 情况 1：压力钢管目前现状应力及变形分布。
- 情况 2：压力钢管目前现状（原混凝土垫板）+加固方案（非闭合加劲环）+外压力。
- 情况 3：压力钢管目前现状（原混凝土垫板）+加固方案（内衬钢管）+外压力。