

# 水电站压力管道

第七届全国水电站压力管道学术会议文集

中国水电顾问集团华东勘测设计研究院 组编



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 水电站压力管道

第七届全国水电站压力管道学术会议文集

中国水电顾问集团华东勘测设计研究院 组编



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书收集了有关水电站压力管道新规范、新材料、新技术应用方面的文章，并对新的结构计算方法进行了探讨。全书分压力管道，分岔管，伸缩节、波纹管及蜗壳，施工工艺及材料4个部分，共77篇文章。其中，压力管道41篇，分岔管12篇，伸缩节、波纹管及蜗壳5篇，施工工艺及材料19篇。

本书可供水电站压力管道设计、生产、制造、安装的技术人员学习参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

水电站压力管道：第七届全国水电站压力管道学术会议文集/中国水电顾问集团华东勘测设计研究院组编. —北京：中国电力出版社，2010.4

ISBN 978-7-5123-0197-9

I. ①水… II. ①中… III. ①水力发电站—压力管道—学术会议—文集 IV. ①TV732.4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 039180 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2010年4月第一版 2010年4月北京第一次印刷  
880毫米×1230毫米 16开本 28.75印张 869千字 2插页  
印数0001—1500册 定价 98.00元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

## 编 委 会

顾 问 周尚洁 党林才 鲁一暉

主任委员 张春生

副主任委员 马善定 邱彬如 钟秉章

侯 靖 周才全

委 员 (按拼音排序)

陈丽芬 陈念水 邓学平 费京伟

冯仕能 黄彦昆 李 云 廖仁强

毛文然 宋守平 伍鹤皋 肖贡元

湛正刚

# 水电站压力管道

## 第七届全国水电站压力管道学术会议文集

### 前 言

近年来随着我国高水头大容量水电工程的建成或开工建设，水电站压力管道的规模越来越大，技术难度越来越高，压力管道的结构设计、材料选用、施工技术、管理运行等方面均反映了我国水电工程的综合实力。我们取得了很大的成绩，同时也面临不少的挑战。

为促进水电站压力管道结构设计和工程实践的进步，交流水电站压力管道近年来在设计、科研及施工方面的科技成果，由中国水力发电工程学会水工及水电站专委会、中国水利学会水工结构专委会、水电站压力管道信息网、中国水电顾问集团华东勘测设计研究院共同组织，于2010年4月在杭州召开“第七届全国水电站压力管道学术会议”。

交流水电站压力管道建设的成功经验及教训，同步出版本次会议文集，对进一步提高我们在压力管道设计、科研、施工和运行管理方面的技术水平具有重要的现实意义。

本届会议文集共收编论文77篇，分为压力管道，分岔管，伸缩节、波纹管及蜗壳，施工工艺及材料几部分。文集紧紧围绕我国现阶段的水电建设项目，系统地整理了近年来在压力管道的理论研究、工程设计、施工技术、材料选型等方面取得的丰硕成果，全面总结了我国近年来压力管道的建设经验，这些宝贵的技术信息对进一步提高我国压力管道的发展水平将起到很好的促进作用。

在我国近年建设的许多大型水电站和抽水蓄能电站中，地下埋管仍然是主要的引水管道结构形式，如龙滩、拉西瓦、溪洛渡、向家坝、三峡电站以及桐柏、宝泉、惠州、白莲河、黑麋峰、西龙池、张河湾等抽水蓄能电站。虽然地下埋藏式钢管的设计理论和方法变化不大，但钢筋混凝土衬砌的地下埋藏式压力管道的设计、研究和应用都取得了长足的进步。设计理念已经由把围岩看为荷载转变为把围岩作为承载体，提出了以围岩为承载体的地下埋管设计准则，并在实际工程中得到了应用，取得了显著的经济效益。

近年来，混凝土坝下游面钢衬钢筋混凝土压力管道（简称背管）在国内得到了进一步的推广和应用，如金沙江中下游的金安桥、阿海、龙开口、观音岩、向家坝水电站以及澜沧江下游的景洪水电站。这些电站大多为碾压混凝土重力坝，管道 $HD$ 值一般均在 $1500\text{m}^2$ 以上，不仅管道规模巨大，而且要承受高烈度地震（例如9度）的荷载作用。为此，近几年来重点对这种压力管道管坝接缝面的形式及其对管道抗震性能的影响进行了专门的研究，取得了许多有益的成果，为坝下游面钢衬钢筋混凝土压力管道在高烈度地震区的推广应用提供了有力的理论支撑。但背管结构裂缝在一些工程中依然存在，有必要在总结愈来愈多的监测数据的基础上，认真分析规律、总结经验，为设计提出更科学的依据。

随着水电站建设规模的扩大，引水发电系统分岔管的  $HD$  值也愈来愈高。在广大工程技术人员的共同努力下，无论是钢岔管还是钢筋混凝土岔管设计、施工，都取得了前所未有的成就。地下埋藏式钢岔管已由过去的按明钢岔管考虑开始向围岩联合承载转变。针对目前广泛采用的月牙肋钢岔管布置形式，中国水电工程顾问集团公司以企业标准的形式编制了《地下埋藏式内加强月牙肋岔管设计导则》，这个导则将为我国大型地下埋藏式钢岔管的建设起到重要的指导作用。地下埋藏式钢筋混凝土岔管的设计也已经实现了把围岩作为承载体的转变，这不仅大大简化了施工工艺，而且取得了很高的经济效益。

随着三峡、龙滩、拉西瓦和小湾等巨型水电站的建成发电，水轮机蜗壳结构形式（或埋入方式）的优化设计研究也取得了喜人的成果。除了充水保压蜗壳结构形式外，垫层蜗壳和直埋蜗壳也已经成功地应用于三峡、龙滩、拉西瓦等水电站的 700MW 巨型水轮发电机组，且在综合垫层蜗壳和完全直埋蜗壳优点的基础上，创造性地提出了设置局部垫层的直埋蜗壳新结构形式，为我国溪洛渡、向家坝等一大批巨型水电站蜗壳结构形式的选择提供了完善的设计理论方法和丰富的工程实践经验。

此外，在长距离、复杂地基和高地震区的输水钢管设计、施工、新材料和新工艺的研究等方面，我们也取得了丰硕的成果。

以上成果的取得，不仅为水电站压力管道专业的技术进步提供了坚实的理论基础和丰富的工程实践经验，而且值得我们进一步总结、分析和交流。因此，有理由相信本文集对于提高我国水电站压力管道的设计、研究、施工和运行水平将起到重要的促进作用。

在文集的编制过程中得到了全国各水电水利工程设计、施工、科研院所等相关单位以及诸多专家的大力支持，在此对他们表示衷心的感谢！

囿于我们在文集组编上的经验和技术水平等因素，本文集尚存在一定的不足，亦敬请广大读者谅解。

论文集编委会

2010 年 4 月

# 水电站压力管道

## 第七届全国水电站压力管道学术会议文集

# 目 录

前言

## 一、压力管道

以围岩为承载体的高压管道设计准则与工程应用 .....	张春生	(3)
水电站压力钢管设计规范中的若干问题 .....	钟秉章 陆 强	(8)
锦屏二级水电站高压管道设计 .....	侯 靖 吴旭敏 潘益斌	(13)
溪洛渡水电站压力管道设计 .....	邱 云 杨怀德 苟芳蓉 张娅琴	(20)
西龙池抽水蓄能电站输水建筑物的布置与设计 .....	王志国 杜英奎 陈燕云	(27)
向家坝水电站坝后厂房进水口坝段结构三维有限元分析 .....	辜晓原 石长征 许 莉 伍鹤皋	(38)
哈萨克斯坦玛依纳水电站压力管道设计 .....	杨兴义 陈亚琴 刘朝清	(46)
天荒坪第二抽水蓄能电站高压管道衬砌形式研究 .....	彭六平 陈丽芬	(52)
积石峡水电站压力管道设计及分析 .....	张曼曼 石广斌 邱 敏 费秉宏	(61)
大型倒虹吸钢管的设计研究及工程应用		
——掌鸠河引水供水工程倒虹吸钢管设计研究及应用 .....	李 云 马国萍	(66)
蒲石河抽水蓄能电站引水压力钢管设计 .....	张建辉 顾一新 姜树立	(81)
龙开口水电站压力钢管设计 .....	余雪松 黄东军 孙 健 陈 涛	(86)
石门坎水电站压力管道设计 .....	丁 易 邵 岩	(91)
洪屏抽水蓄能电站引水压力管道布置研究 .....	陈丽芬 夏自平 姜长飞	(95)
耶瓦水电站坝后背管三维有限元分析 .....	郑 军 胡顺志 常 颖 谭志军 陈立秋	(98)
洛古水电站压力管道设计 .....	韩华超 孟江波 陈丽芬 冯仕能	(103)
马鹿塘水电站一期工程钢管道设计 .....	刘项民 吴贵春	(108)
江边水电站高压管道设计 .....	高 悦 王东锋 吴 疆	(114)
锦屏二级水电站上游调压室形式优选研究 .....	吴旭敏 潘益斌 侯 靖	(119)
珊溪水库文成供水隧洞及调压井水力过渡过程分析 .....	张 迈 程功文	(127)
浅槽式坝后背管三种管坝接缝面形式的分析与比较 .....	伍鹤皋 王 杰 石长征	(134)
重力坝背管形式对抗震性能的影响 .....	牛志国 胡少伟 沈 捷 王爱林	(141)
水电站压力钢管与混凝土之间的接触灌浆 .....	傅金筑 张淑婵	(145)
水电站压力埋管钢衬起始位置确定探讨 .....	冯仕能	(153)
某水电站地下埋管松弛围岩洞段结构复核分析 .....	房敦敏 潘益斌 吴旭敏 侯 靖	(156)
坝后式水电站压力钢管厂坝过缝措施研究 .....	杨丽娜 伍鹤皋	(161)
水电站引水压力管道受力分析与结构设计研究与应用 .....	张多新 马文亮 刘东常	(166)

采用 ANSYS 软件进行坝内埋管应力分析 .....	陈 涛	(172)
钢衬钢筋混凝土坝后背管弹塑性分析 .....	马文亮 刘东常 张多新	(177)
跨断层倒虹吸明钢管对断层错动位移的适应性研究 .....	石长征 伍鹤皋 徐海洋 苏 凯 马国萍 李 云	(180)
加劲环式压力钢管全面失稳计算的一种新方法 .....	马文亮 刘东常 张多新	(187)
尾水调压井体形设计优化 .....	王文芳	(191)
矩形截面钢管的抗外压能力分析 .....	孟江波 徐智刚	(198)
某水电站设垫层的坝内埋管计算研究 .....	孙 健 陈 涛	(203)
某水电站高压管道竖井检修通道设计初探 .....	吴家耀 潘益斌 侯 靖 吴旭敏	(208)
三岔水电站发电引水隧洞穿断裂带段动力分析 .....	叶埏兴 陈 雯 娄绍撑	(211)
铅直平面内压力管道弯道效应的分析研究 .....	张兰丁	(215)
李家峡坝后背管原型观测资料分析 .....	蒋锁红	(218)
基于 CAD 三维建模的石门坎电站引水系统流态数值模拟 .....	邵 岩 丁 易	(229)
水电站压力钢管事故、处理和防范 .....	钟秉章	(238)
三峡水电站压力管道混凝土裂缝现状及初步分析 .....	陈际唐	(244)

## 二、分 岔 管

月牙肋钢岔管结构的优化 .....	邱彬如	(251)
肋板对明岔管的应力分布影响 .....	陆 强	(257)
月牙肋钢岔管腰线转折角应力集中系数研究 .....	罗金山 伍鹤皋 苏 凯	(262)
关于内加强月牙肋岔管肋板用钢材 Z 向性能级别选择的初步探讨 .....	王志国	(268)
江苏宜兴抽水蓄能电站埋藏式钢岔管应力探讨 .....	姜长飞	(273)
喜儿沟水电站钢岔管结构优化设计 .....	何新红 牛天武 石广斌 王海华	(279)
马鹿塘水电站一期工程钢岔管设计 .....	刘项民 张 慧 吴贵春	(285)
张河湾抽水蓄能电站埋藏式内加强月牙肋钢岔管设计 .....	郭 雪	(290)
楼下河水电站钢筋混凝土岔管结构分析与配筋计算 .....	马文亮 刘东常 谢 巍	(296)
东江水电站扩机工程引水岔管结构形式与受力特性研究 .....	许 莉 熊春耕 苏 凯 伍鹤皋	(300)
钢衬钢筋混凝土岔管三维非线性损伤分析 .....	汪艳青 伍鹤皋 苏 凯	(309)
一道桥水电站岔支管 11.5MPa 水压试验浅析 .....	岳廷文 米 嘉 赵小勇	(315)

## 三、伸缩节、波纹管及蜗壳

水电站配水环管结构充水保压值优化分析 .....	张启灵 伍鹤皋 王 平 赵 玮 郑湘文	(323)
大型水电站直埋式蜗壳结构接触非线性分析 .....	张存慧 马震岳 张运良	(329)
循环荷载作用下充水保压蜗壳混凝土的损伤研究 .....	许新勇 马震岳 张宏战 张存慧 徐 伟	(333)
高水头抽水蓄能电站蜗壳非线性分析 .....	吴海林 李 瑶 段自力	(338)
取消伸缩节在石堤水电站的设计与应用 .....	游志纯 胡 伟 高 宇	(343)

## 四、施工工艺及材料

三峡大型压力钢管制造安装技术综述 .....	张为明 卫书满 陈群运	(351)
------------------------	-------------	-------

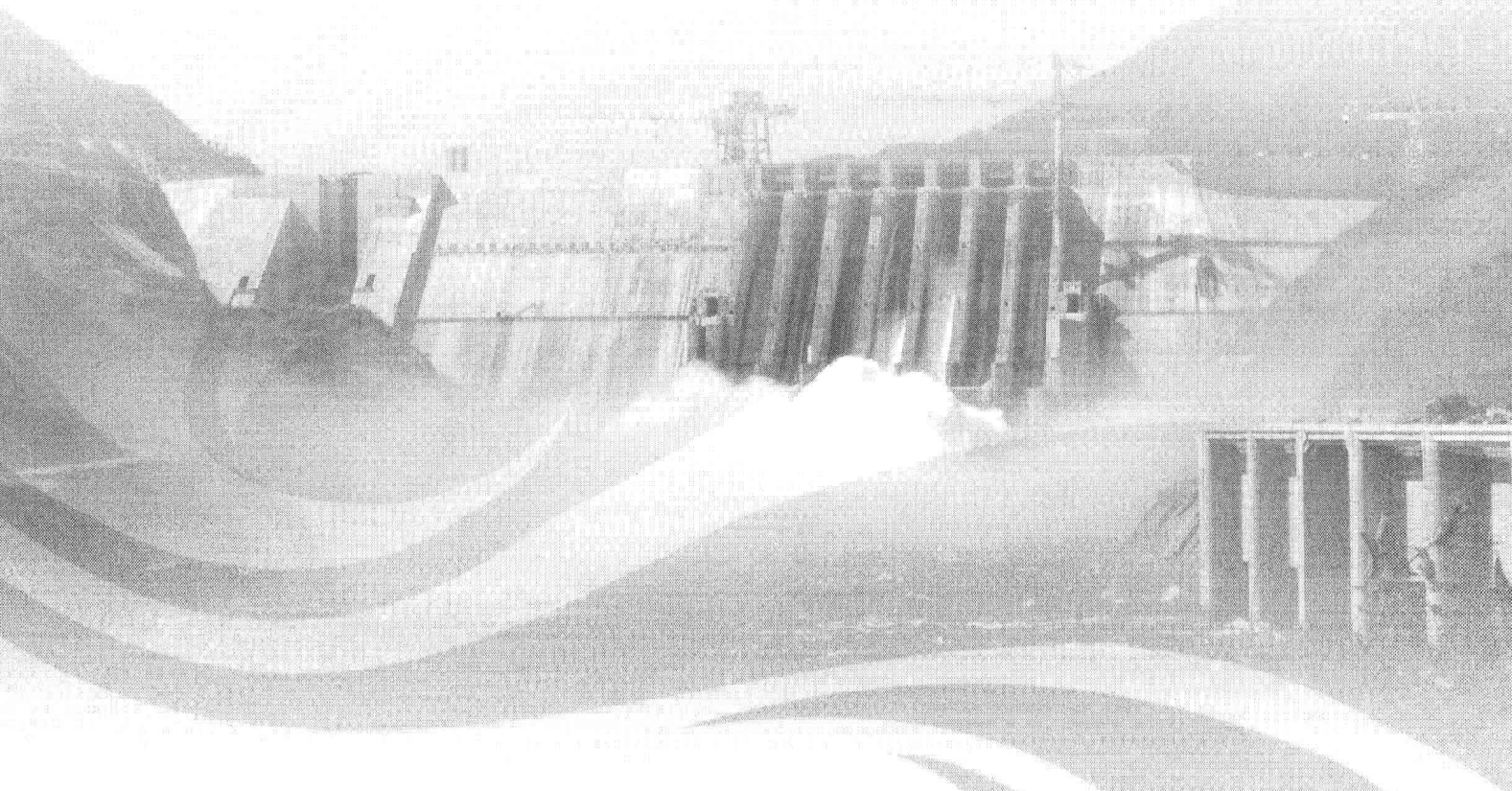


大型水轮机低碳调质高强钢蜗壳电站现场焊接技术 .....	漆卫国	(357)
高强钢压力钢管取消焊后消应原因分析 .....	万天明	(364)
压力钢管焊接变形控制 .....	陈双发 左琛	(368)
隧洞式引水压力钢管(埋管)洞内组圆制造安装技术 .....	万天明 姚秀全	(374)
压力钢管安装非水平管段管口位置误差计算与应用 .....	陈群运 张为明 李波 卫书满	(379)
张河湾抽水蓄能电站压力钢管焊接工艺参数确定 .....	杜天棕 王建华	(386)
印度尼西亚阿萨汉水电站引水系统钢结构制造和安装 .....	张忠和 王志浩 张帆 邹梅	(392)
西龙池抽水蓄能电站引水系统钢管制造安装工艺 .....	张忠和 李少光 张帆 么革安	(398)
彭水水电站 14m 直径压力钢管制造安装总体方案优化 .....	赵云德 姚秀全 王海军	(406)
彭水水电站压力钢管主材(WDL610D 钢)的焊接技术 .....	姚秀全 万天明 黎小林	(410)
西溪河地洛电站压力钢管安装技术 .....	苏利峰 成凤	(415)
四川鸭嘴河烟岗和跑马坪水电站压力钢管制造 .....	胡尚军 李宁 李智丽	(419)
赛珠水电站高水头球形岔管制作工艺 .....	罗玉霞	(423)
彭水特大型压力钢管的瓦片弧度控制 .....	姚秀全	(426)
三峡地下电站巨型压力钢管安装下滑溜放方案设计 .....	乐丰 陈群运 张为明	(429)
光照水电站压力管道施工 .....	王洪军 卢昆华	(435)
玻璃钢管在石马岱电站中的应用 .....	范土贵 朱苏华	(440)
小水电站压力管道地面纵断面测绘方法 .....	何坤林	(445)

水电站压力管道

第七届全国水电站压力管道学术会议文集

# 一、压力管道





# 以围岩为承载体的高压管道设计准则与工程应用

张春生

(中国水电顾问集团华东勘测设计研究院 浙江杭州 310014)

**[摘要]** 钢筋混凝土衬砌高压管道设计中最主要的问题是要防止高压水外渗造成的水量损失和对山体边坡、电站建筑物等的危害。采用钢筋混凝土衬砌高压管道的前提是所在山体的围岩应该相对新鲜、完整,其设计的核心是要对地形地质条件、地应力和高压水作用下围岩渗透性、围岩水力稳定性等进行充分的研究。通过对水电站混凝土衬砌高压管道实例的分析,对高压水作用下钢筋混凝土衬砌高压管道设计常用的最小覆盖厚度准则、水力劈裂准则和最小地应力准则的相互关系和应用条件进行了讨论。

**[关键词]** 混凝土衬砌 高压管道 设计准则

## 0 引言

大型水电站压力管道有钢板衬砌或钢筋混凝土衬砌两种形式。钢板衬砌压力管道投资相对较大,制作、运输、施工工艺等复杂、要求高,比较而言,钢筋混凝土衬砌的压力管道具有投资省、施工方便等诸多优点,因而在水电站地下输水道系统中得到广泛应用。采用钢筋混凝土衬砌高压管道最主要的问题是,要防止高压水外渗造成的水量损失和对山体边坡、电站建筑物等的危害。

钢筋混凝土衬砌地下高压管道的设计理念与钢板衬砌地下高压管道的设计理念有着本质的区别。采用钢板衬砌的地下高压管道,在结构分析中认为钢板是不透水材料,按照地下埋管中钢衬、混凝土、围岩联合受力方式进行结构分析设计,其基本概念是认为水压以面力方式作用于钢衬内表面,围岩仅是单纯地承受通过钢衬和回填混凝土传递来的荷载。

对钢筋混凝土衬砌的地下高压管道,针对混凝土衬砌本身在高压水作用下的研究已经开展了大量工作,但如何认识围岩在其中的作用,充分发挥围岩承载高压水的能力,还存在一些误区。由于混凝土自身的渗透系数比钢板要大得多,同时在高压水作用下混凝土将发生开裂,高压水不可避免地将渗透到具有一定渗透特性的围岩中,高压水对围岩的作用就不再是单纯的荷载,更不是面力作用方式,而是变成了高压水与围岩交互作用的体积力,问题就要复杂得多。这种情况下,最重要、最核心的问题是对地形地质条件、地应力、围岩渗透、围岩水力稳定性等的研究,以及必要时对围岩的适当加固改造。

钢筋混凝土衬砌地下高压管道设计中,目前常用的设计判断准则有最小覆盖厚度准则、最小地应力准则、水力劈裂准则等,由于对各种准则的理解存在一些误区,在实际运用时往往忽略了其理论要点或工程的具体地质条件,导致一些工程在实际运用时发生问题,甚至事故,例如挪威的 Bjerka 电站、哥伦比亚 Chivar 电站等。本文结合工程实际运用,对上述准则及其相互关系进行了讨论。

## 1 最小覆盖厚度准则

能否采用钢筋混凝土衬砌高压管道,首先取决于宏观的地形和地质条件。一般来讲,在地形上应该满足最小覆盖厚度准则(见图1),即

$$L \geq \frac{\gamma_w \times H}{\gamma_r \cos \beta} F \quad (1)$$

式中  $L$ ——高压管道计算点到地表最小距离;

$H$ ——静水压力;

$\gamma_w$ 、 $\gamma_r$ ——水和岩石容重；  
 $\beta$ ——山体平均坡角；  
 $F$ ——安全系数（一般取 1.3~1.5）。

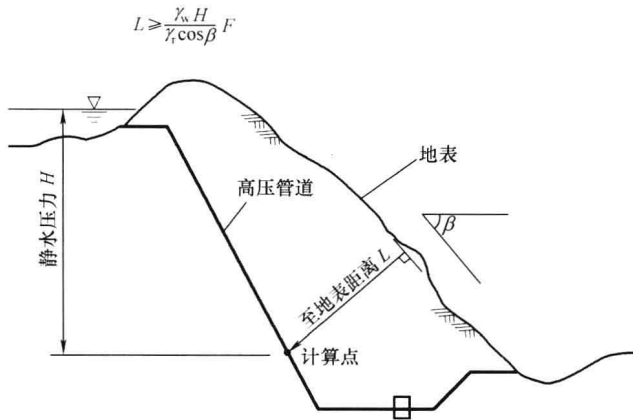


图 1 最小覆盖厚度准则

对于比较陡峭或不规则的地形，隧洞或高压管道水平向（侧向）岩体覆盖厚度常常起着控制作用，这时还需要对侧向岩体覆盖厚度进行补充校验，要求高压管道水平向（侧向）岩体覆盖厚度  $L_H$  不小于岩体正向覆盖厚度  $L$  的两倍，即  $L_H \geq 2L$ 。

在具体运用时要注意以下几点：

(1) 最小覆盖厚度准则实际上是一个半经验性的准则，它仅仅是为混凝土衬砌地下高压管道的洞线布置和初步判断提供一个快捷的方法，并没有考虑岩体具体的构造、节理和地质缺陷的影响，实际上有些工程尽管符合最小覆盖厚度准则却仍然发生问题，例如挪威的 Bjerka 电站， $H=72\text{m}$ ， $L=58\text{m}$ ， $\beta=25^\circ$ ，按照式 (1) 得  $F=1.83$ ，但建成后大量渗水，其原因是存在顺坡缓倾角节理和结构面，垂直于节理面的正应力很小，在高压水作用下弱面开裂。同时，也有不满足式 (1) 却仍然成功建设的工程，例如我国的天荒坪抽水蓄能电站， $H=680.2\text{m}$ ， $L=330\text{m}$ ， $\beta=40^\circ$ ，按照式 (1) 得  $F=0.985$ ，不满足最小覆盖厚度准则的要求，但结合地应力测试与分析、高压渗透试验等，最终成功建成钢筋混凝土衬砌高压管道和岔管。图 2 给出了按照最小覆盖厚度准则对 63 个压力隧洞的校验结果，充分说明了上述问题。

盖厚度准则却仍然发生问题，例如挪威的 Bjerka 电站， $H=72\text{m}$ ， $L=58\text{m}$ ， $\beta=25^\circ$ ，按照式 (1) 得  $F=1.83$ ，但建成后大量渗水，其原因是存在顺坡缓倾角节理和结构面，垂直于节理面的正应力很小，在高压水作用下弱面开裂。同时，也有不满足式 (1) 却仍然成功建设的工程，例如我国的天荒坪抽水蓄能电站， $H=680.2\text{m}$ ， $L=330\text{m}$ ， $\beta=40^\circ$ ，按照式 (1) 得  $F=0.985$ ，不满足最小覆盖厚度准则的要求，但结合地应力测试与分析、高压渗透试验等，最终成功建成钢筋混凝土衬砌高压管道和岔管。图 2 给出了按照最小覆盖厚度准则对 63 个压力隧洞的校验结果，充分说明了上述问题。

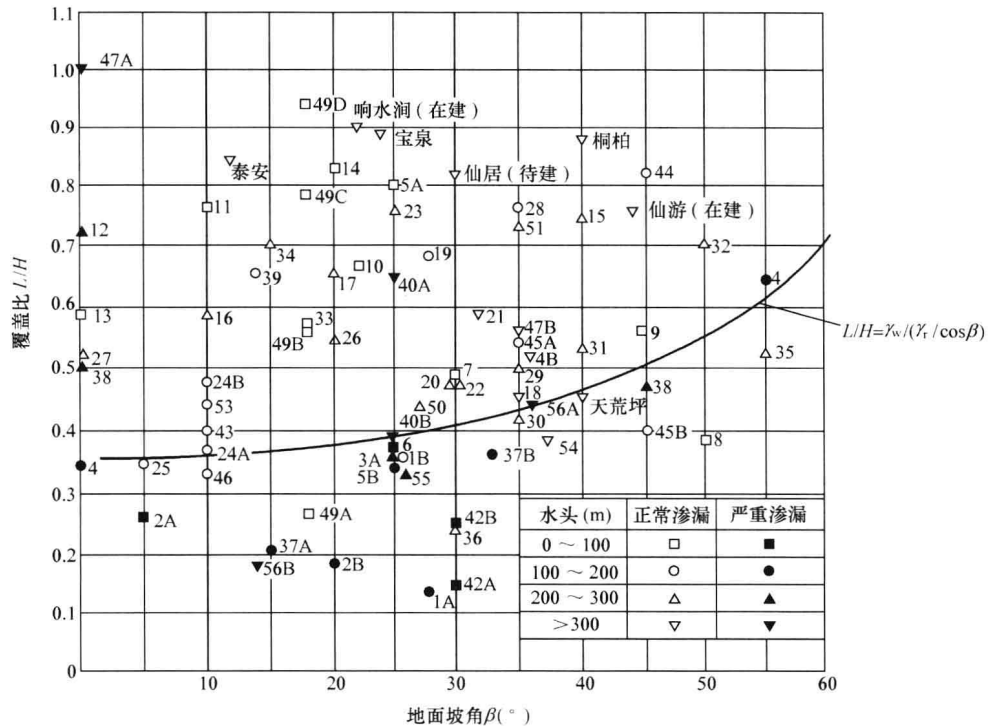


图 2 最小覆盖厚度准则的工程校验（据 T. L. Brekke 和 B. D. Ripley）

(2) 采用最小覆盖厚度准则，应该对不规则地形进行适当修正，一些单薄的地形应该去除。例如哥伦比亚 Chivar 电站，竖井上部的  $L/H$  在地形修正前为 0.65，考虑对单薄山脊修正以后， $\beta=25^\circ$ ， $L/H$  仅为 0.39，运行后发生渗漏。

(3) 在注重上部岩体覆盖厚度的同时，还应注重侧向岩体的厚度。

(4) 高压管道沿线岩体应新鲜、完整, 构造节理不发育, 特别注意有无平行于高压管道轴线的构造或较大顺坡结构面的存在。

## 2 水力劈裂准则

研究表明在内水压力超过 100m 水头后, 由水压引起的钢筋混凝土衬砌的裂缝就已经产生了, 因此钢筋混凝土衬砌高压管道研究的核心是围岩体在高压水作用下的抗渗、防渗、和渗透稳定问题。

完整岩块的透水性微弱, 水在岩体中的流动是沿岩体中的裂隙或节理进行的。由于围岩中地应力的存在, 任何节理或裂隙面上都存在着一个法向应力  $\sigma_n$ , 水力劈裂准则要求

$$\sigma_n \geq H \quad (2)$$

当满足式 (2) 时, 水压作用下围岩节理或裂隙面上不会产生拉应力, 围岩不会发生水力劈裂; 反之, 节理或裂隙将会张开, 按照立方定理, 通过裂隙的流量与隙宽的 3 次方成正比, 高压管道将产生大的渗漏或破坏。

严格来讲, 水力劈裂准则应该考虑节理面的抗拉强度  $\sigma_L$ , 按式 (3) 考虑, 即

$$\sigma_n + \sigma_L \geq H \quad (3)$$

也就是说, 节理或裂隙面上的法向应力与抗拉强度之和共同抵抗钢筋混凝土衬砌高压管道内的水压力。但抗拉强度只有在节理密闭的情况下才可能存在, 并且一旦受到破坏后, 不可恢复。图 3 与图 4 为天荒坪抽水蓄能电站岩体高压渗透试验 1 号孔 34.6~50m 段的试验结果: 第一次试验中, 在维持 8.7MPa 试验压力 5min 之后, 压力升至 9.2MPa, 几分钟之内渗水量迅速从 2L/s 增大到 11.7L/s, 压力却降到 9.0MPa, 之后迅速卸压到 0.2 MPa。

第二次试验中, 当压力升至 7.6 MPa 时, 渗水量急剧增加。说明在第一次试验中当  $H > \sigma_n + \sigma_L$  时, 产生了水力劈裂, 节理面上的部分抗拉强度消失, 在第二次试验中  $\sigma_L$  大大减小。实际上, 进一步的试验表明, 1 号孔的 41~50m 段为最薄弱部位, 稳定试验压力只有 5.2 MPa。

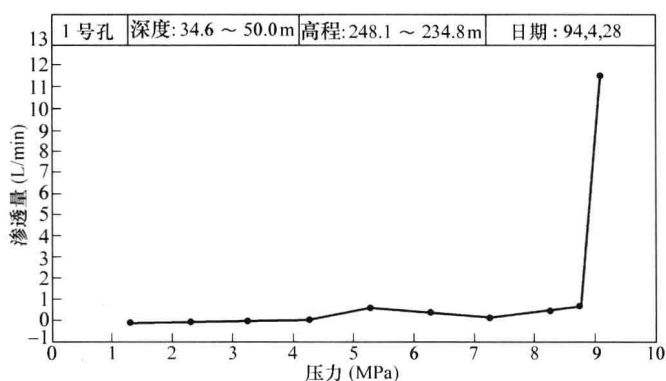


图 3 高压渗透试验 1 号孔第一次试验压力与渗漏量曲线

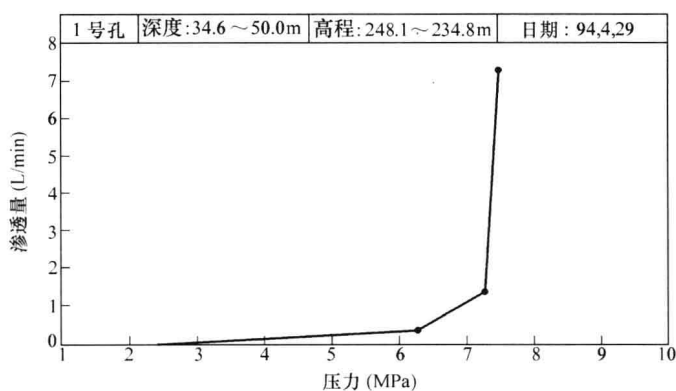


图 4 高压渗透试验 1 号孔第二次试验压力与渗漏量曲线

因此基于安全考虑, 水力劈裂准则中一般不考虑节理面的抗拉强度  $\sigma_L$ , 仅将其作为安全储备, 通常采用式 (2) 的表述形式。

水力劈裂从理论上解释了钢筋混凝土衬砌高压管道产生渗漏或破坏的原因, 给出了相应的设计准则, 然而在实际运用时却存在困难, 因为我们不可能将高压管道全线不同产状节理裂隙的  $\sigma_n$  值都一一获得, 但该准则对于我们正确理解钢筋混凝土衬砌高压管道设计的本质却是至关重要的。

## 3 最小主应力准则

在获得一定数量的实测地应力值后, 结合区域地应力分析, 可以比较好地获得工程区的初始地应力场分布, 利用三个主地应力分量中的最小主应力  $\sigma_3$ , 来与高压管道中的内水压力  $H$  进行比较, 即得到最小主应力准则, 即

$$\sigma_3 \geq F\gamma_w H \quad (4)$$

式中：安全系数  $F$  一般取 1.3~1.5。

最小主应力准则实际上是将难以获得的节理或裂隙面上的法向应力  $\sigma_n$  用最小主应力  $\sigma_3$  来替代，是对水力劈裂准则的一种工程概化。最小主应力准则是经过概化后的纯理论准则向实际工程运用准则转化的一个范例，因而在钢筋混凝土衬砌高压管道，特别是高水头管道设计中得到了最为广泛的应用。

对最小主应力准则的运用仍然要与具体工程的实际地质情况相结合，因为我们所面临的研究对象是非均质的、复杂多变的地质体。

(1) 不能简单套用。有不满足最小主应力准则而仍然成功建成的高压管道，例如挪威的 Mauranger 水电站， $H=455\text{m}$ ， $\sigma_3=0.5\sim 1.2\text{MPa}$ ，即相当于 50~120m 水头，建成后初始渗漏量为 0.5L/s，山体饱和后渗漏量仅 0.1L/s，其主要原因是工程区不存在与最小主应力正交或接近正交的节理。在这种情况下，实际上起控制作用的因素是中间主应力和最大主应力在节理面上的法向应力分量，所以按照式 (2) 的水力劈裂准则来判断仍然可以满足。

(2) 应用时要充分考虑地质构造对局部地应力降低所产生的影响，例如挪威 Byrte 水电站和哥伦比亚 Chivar 水电站，由于存在顺坡的断层、破碎带或节理和剪切带，导致局部地应力不能满足式 (4) 的要求而发生大量渗漏。

(3) 对于水头特别高的电站，应进行必要的高压渗透试验进行现场验证，以便获取围岩在高压水作用下的渗透性和渗透稳定性的第一手资料，慎重做出决策。例如天荒坪工程，岔管及其上游水道均采用钢筋混凝土衬砌，最大静水压力  $H=680\text{m}$ ，以最小主应力准则判断，高压管道沿线最小主应力总体满足准则要求，见图 5。但勘探认为岔管区域节理裂隙局部发育有可能使局部地应力水平降低，因而采用高压渗透试验对岔管区域围岩在高水压作用下的渗透性、水力稳定性等进行了进一步研究。试验表明 2 号岔管所处位置由于受节理裂隙影响，局部地应力仅为 5.2 MPa，不满足要求。

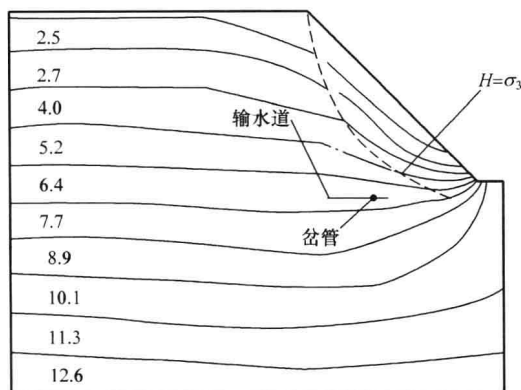


图 5 天荒坪工程最小主应力与静水压力的比较

在实际施工中进行了高压固结灌浆处理，最高灌浆压力达到 9MPa。电站建成后监测成果显示钢筋混凝土衬砌高压管道的渗漏量约为 15.7 L/s，表明工程处理措施是成功的。

因此，在具体工程运用时，不可以机械地套用某个准则，要理解上述几个准则的核心和本质，同时要注重对工程具体地质条件的深入分析，注重断层、构造、节理裂隙的影响，避免由于对局部地质条件变化研究不够而发生问题。

#### 4 结语

采用钢筋混凝土衬砌地下高压管道的前提是围岩应相对新鲜、完整。当水头超过一定范围后，围岩是钢筋混凝土衬砌地下高压管道的主要承载体，工程设计的核心是对地形地质条件、地应力、围岩渗透、围岩水力稳定性等的研究。对目前常用的最小覆盖厚度、水力劈裂、最小地应力设计准则等，要在理解其理论意义的基础上加以实际运用，否则容易引起误导。对水头特别高的钢筋混凝土衬砌高压管道或重要工程，要结合高压渗透试验对围岩在高水压作用下的渗透性、水力稳定性等进行研究论证。只要总体上符合设计准则的要求，节理构造等引起的局部部位地应力偏低问题可以通过灌浆等工程措施来进行处理。

#### 参考文献

- [1] 钟建文, 谷兆祺, 彭守拙. 高压隧洞衬砌设计配筋研究. 水力发电学报, 26 (2): 43~46.

- [2] 杨林德, 丁文其. 渗水高压引水隧洞衬砌设计研究. 岩石力学与工程学报, 16 (2): 112~117.
- [3] 张有天. 岩石水力学与工程. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [4] 张有天. 论有压水工隧洞最小覆盖厚度. 水利学报, 2002 (9): 1~5.
- [5] T. L. Brekke, B. D. Ripley. Design guidelines for pressure tunnels and shafts. University of California at Berkeley (USA), 1987.
- [6] Johannes Hope, Arild Palmstrom, Kjell Finnerud. Rebuilding of the 70 years old Nore 1 Power Plant. Conference on Hydropower' 97, Trondheim, Norway, pp. 631~638.
- [7] 张春生. 混凝土衬砌高压水道的设计准则与岩体高压渗透试验. 岩石力学与工程学报, 28 (1).
- [8] 刘世明, 胡宏磊, 陈鼎. 天荒坪抽水蓄能电站岔管区域高压渗透试验. 岩土工程学报, 18 (6): 31~38.



# 水电站压力钢管设计规范中的若干问题

钟秉章 陆 强

(浙江大学 浙江杭州 310058)

**[摘要]** 本文主要讨论目前水电站压力钢管设计规范中有关钢板材料、有限元计算、埋藏式岔管、外压稳定、岔管水压试验、地震区钢管等涉及的一些问题,旨在引起业界人士在相关工程实践中关注。

**[关键词]** 水电站 钢管 岔管 钢板 外压稳定 水压试验 地震

电力和水利行业先后颁布了现行的两个水电站压力钢管设计规范,即 DL/T 5141—2001(以下简称“电力规范”)和 SL281—2003(以下简称“水利规范”),规范实施以来对水电站压力钢管的设计起到了很好的指导作用,但在工程实践中也暴露出了一些问题,需要适时对现行规范作必要的修订和补充。

## 1 压力钢管所用钢材

两个规范都对钢管管壁、支承环、岔管加强构件等主要受力构件用钢作了规定:

水利规范 4.1.2 条中规定可采用的钢种有:碳素结构钢有 Q235 的 C、D 级钢板;低合金高强度结构钢有 Q345、Q390 的 C、D、E 级钢板;压力容器用钢板有 20R、16MnR、15MnVR、15MnNbR 等。对于 600MPa 及以上高强钢还作了些限制性规定。

电力规范 6.1.2 条中规定可采用的钢种有:碳素结构钢有 Q235 的 C、D 级;低合金高强度结构钢有 Q345 C、D 级及 Q390C、D 级;压力容器钢有 20R、16MnR、15MnVR、15MnNbR 等;高强度压力容器钢有 07MnCrMoVR、07MnNiCrMOVDR 等,并规定明管宜采用压力容器钢。

上述规定存在一些问题,需要修改、补充和说明。

(1) 钢种 20R、16MnR、15MnVR、15MnNbR 都是 1988 年颁布的《低合金高强度结构钢》(GB 1591—1988)中的老牌号,早在 1994 年已有新的标准《低合金高强度结构钢》(GB/T1591—1994)颁布,并明确规定 GB1591—1988 版本的标准作废,新标准的附录 A 列出了新旧低合金结构钢牌号对照表。

(2) 20 世纪 60 年代中期,我们曾呼吁用压力容器钢 20g 来替代 A3,以 16MnR 替代 16Mn,因为当时的钢厂炼钢设备差,钢材的硫、磷含量偏高,非金属夹杂物多,且多数钢厂钢锭小,轧机能力不足,轧制比偏小。压力容器由于接管多,制造时常有临时开孔,因此为了保证焊缝质量,不希望在焊缝处有含硫量高的分层,需严格控制含硫量,另外出厂时需做 100% 超声波检查,以保证分层缺陷不超标。随着冶炼设备及工艺水平的提高,目前大的钢厂对硫、磷含量已能精确控制。大钢厂钢坯厚,轧制碾压比高,通常也不会发生分层缺陷超标。目前钢厂实际生产的钢板均按照压力容器钢板订单要求作 100% 超声波检查,符合要求的加上 R 标志,钢板价格也高些。水电站钢管用钢保证最低运行温度下的冲击值十分重要,如果所订购的容器钢板没有提出韧性冲击附加要求,则不做冲击试验。因此按照新牌号,并根据电站所在地的冬季最低运行温度,订购 Q235、Q345 的 C 或 D 级钢板是合适的,也不必要求钢厂作 100% 出厂超声波检查。

(3) 在严寒地区,当钢管处于运行状况时,其中的水处于流动状态,即使管内壁有冰挂现象,水温也不会在一 20℃ 以下,因此采用 D 级钢材已足够,而多数场合只需要保证 0℃ 冲击,则 C 级钢材也满足要求。因此“水利规范”中列出 Q345 和 Q390 的 E 级钢板是没有必要的。