

王志国 著

SHUIDIANZHAN

MAICANGSHI

NEIJIAQIANG

YUEYALEI CHAGUAN

JISHU YANJIU YU SHIJIAN

水电站埋藏式内加强月牙肋岔管 技术研究与实践



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



水电站埋藏式内加强月牙肋岔管 技术研究与实践

王志国 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以水电站内加强月牙肋岔管技术研究成果为基础,对内加强月牙肋岔管水力特性和结构特性进行系统介绍。书中论述了内加强月牙肋岔管主要体形参数对其水力特性的影响规律;同时对内加强月牙肋岔管尤其是埋藏式岔管的结构特性进行较全面的分析与论述,通过对结构计算、已建工程原型观测资料分析、现场结构模型试验等,系统地总结了埋藏式岔管与围岩联合作用规律,并提出埋藏式内加强月牙肋岔管设计原则和方法。

本书可供水电站引水系统设计、科研、施工、运行管理技术人员以及有关高校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

水电站埋藏式内加强月牙肋岔管技术研究与实践 /
王志国著. — 北京:中国水利水电出版社, 2011. 12
ISBN 978-7-5084-9379-4

I. ①水… II. ①王… III. ①水力发电站—压力管道—岔管—研究 IV. ①TV732.4

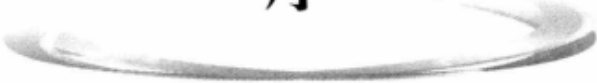
中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第281425号

书 名	水电站埋藏式内加强月牙肋岔管技术研究与实践
作 者	王志国 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 (发行部)
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	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10印张 238千字
版 次	2011年12月第1版 2011年12月第1次印刷
印 数	001—800册
定 价	36.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序



近年来，我国在常规水电站和抽水蓄能电站建设方面取得了举世瞩目的成就。随着水电站装机规模的增大，高压岔管也向高水头大 HD 值（水头与直径的乘积）方向发展，如何保证技术可靠、减少钢板厚度、降低制造和安装难度，成为较为突出的问题。

内加强月牙肋岔管也称为 $E-W$ 型岔管，是由瑞士 Escher wyss 公司开发的，由于受力明确、设计简便、水流流态好、水头损失小、结构可靠、制作安装方便等特点，在国内外大中型常规水电站和抽水蓄能电站的地下埋管中得到广泛应用。

对于大规模岔管，保证其结构可靠，除提高钢材强度外，更主要且经济的方法是考虑围岩分担内水压力，在减少岔管分担荷载的同时，利用围岩约束作用改善岔管应力分布，更利于钢材强度的充分发挥，也达到减少钢板厚度、降低制造和安装难度的目的。中国水电顾问集团北京勘测设计研究院近 20 年来设计建成的高水头抽水蓄能电站，如十三陵、张河湾、西龙池等，均选用了地下埋藏式月牙肋岔管方案，因而在这方面进行了较多的研究。

本书作者是北京勘测设计研究院教授级高级工程师，长期从事水电站厂房和压力管道设计工作，具有丰富的工程实践经验，曾作为课题负责人主持完成了原国家电力公司科技项目“内加强月牙肋岔管技术研究”，并在此基础上主持完成《地下埋藏式月牙肋岔管设计导则》（Q/HYDROCHINA 008—2011）的编制。本书是在总结“内加强月牙肋岔管技术研究”科研成果和已建工程成功经验的基础上撰写而成，全面地介绍了内加强月牙肋岔管的水力特性、结构特性以及与围岩联合作用的规律，并系统地提出了埋藏式内加强月牙肋岔管考虑围岩分担内水压力的设计原则和方法，对这项技术的推广应用很有价值。

北京勘测设计研究院 总工程师

吕明治

前 言



岔管是水电站输水系统一管多机布置方式的重要组成部分,随着我国西部水电开发和大型抽水蓄能电站的建设,高压岔管随之向规模化发展。由于内加强月牙肋岔管具有受力明确合理、设计方便、水流流态好、水头损失小、结构可靠、制作安装容易等特点,在国内外大中型常规和抽水蓄能电站的地下埋管中得以广泛的应用。对于大规模岔管如何减少钢板厚度,降低制造、安装难度成为比较突出的问题。减少岔管厚度除采用高强度钢板外,主要途径有两条:一是通过优化布置及设计参数,改善应力状态,充分发挥材料强度,但这种作用是有限的;二是利用围岩弹性抗力和约束作用,考虑围岩分担内水压力设计,减少岔管分担的荷载,使岔管应力分布趋于均匀,从而达到减薄钢板的目的。

较优的岔管体形,既要满足水力特性要求,又要满足结构特性要求。然而,目前国内外对月牙肋岔管水力特性进行较为系统研究的成果不多,没有对岔管主要体形参数对其水力特性的影响给出明确的界限。对于地下埋藏式岔管,国内外常按明管设计,围岩分担内水压力作用仅作为一种安全储备。这不仅是由于岔管距厂房较近,按明管设计趋于安全,更主要的是没有一种恰当的设计理论、方法和成功的经验。对于大规模岔管,考虑围岩分担内水压力的意义不仅仅在于节约钢材用量,更重要的是减少钢板厚度,降低岔管制作、安装难度。以往有些工程也曾不同程度地考虑围岩分担内水压力,但仅限于经验做法。

随着我国大规模岔管出现,如西龙池、张河湾、宜兴、溧阳、天荒坪二期等抽水蓄能电站,岔管的技术可行性成为比较突出的问题,迫使设计人员开始考虑围岩分担内水压力设计。尽管岔管考虑围岩分担内水压力设计在国内外尚处于探索阶段,但在数值计算和观测设备快速发展的今天,将使埋藏式岔管考虑围岩分担内水压力设计成为可能。

为系统研究埋藏式内加强月牙肋岔管的水力特点和结构特性,“内加强月牙肋岔管技术研究”被列为原国家电力公司 2001 年度科技项目“内加强月牙

肋岔管技术及坝后背管裂缝研究”。中国水电顾问集团北京勘测设计研究院承担了“内加强月牙肋岔管技术研究”部分的工作。王志国为该部分课题的负责人，主要参加人员有：邱彬如、张沁成、王建华、耿贵彪、张红梅、杜英奎、高永辉、白宇、范建章、杜秀惠、杨晓辉、陈燕云、刘宝昕等，该科研工作于2004年年底完成，并荣获中国水电顾问集团公司2006年度科技进步一等奖、2007年度中国电机工程协会科技进步三等奖。

根据中国水电工程顾问集团公司的安排，在此科研基础上，由中国水电顾问集团北京勘测设计研究院首次组织编写了《地下埋藏式月牙肋岔管设计导则》（Q/HYDROCHINA 008—2011），王志国为本导则编制负责人，主要参加人员有：邱彬如、吕明治、李振中、王建华、杜英奎、仝壮信、耿贵彪、高永辉、王毅鸣、韩立、王文芳、蒋远超、关李海、黄海峰等。我们完成的“大型水电站地下埋藏式月牙肋岔管技术开发与标准编制”荣获中国水力发电工程学会2010年度科学技术三等奖。

本书是在上述科研成果的基础上，结合已建岔管工程经验，对内加强月牙肋岔管进行了较全面的论述。希望本书能为我国大型岔管技术的发展尽点微薄之力。

本书共分12章，第1章，简述国内外岔管设计、制作现状及研究水平。第2章，介绍内加强月牙肋岔管的受力特点。第3章，介绍高水头、大HD值岔管的布置特点。第4章，介绍内加强月牙肋岔管的水力特性，较系统地论述主要体形参数对其水力特性的影响。第5章、第6章，介绍内加强月牙肋岔管的结构特性，通过三维有限元和大比尺结构模型试验成果，说明明管状态和埋管状态岔管受力特点和应力状态。第7章，通过对已建工程原型观测资料分析，说明埋藏式岔管的受力特点。第8章，介绍埋藏式岔管考虑围岩联合作用的工程设计实例。第9章，论述岔管钢材选择的特点。第10章，介绍埋藏式岔管考虑围岩联合作用时，水压试验的特点。第11章，简述埋藏式岔管构造要求和工程措施。第12章，介绍埋藏式岔管原型观测设计特点。

在科研过程中得到了西龙池抽水蓄能电站有限责任公司吕田副总经理、王敦厚副总工程师、浙江大学钟秉章教授、清华大学段云岭教授、武汉大学秦继章教授、中国水利水电科学研究院水力学研究所孙双科博士、北京航空航天大学刘沛清教授、黄河水利职业技术学院刘宪亮教授等的大力支持，在此一并表示衷心的感谢！

在本书编写过程中得到了北京勘测设计研究院原总工程师邱彬如大力支持与帮助，以及曹楚生院士、昆明勘测设计研究院诸葛睿鉴教授级高级工程师

师、武汉大学伍鹤皋教授的悉心指导，在此表示衷心的感谢！书后虽列有参考文献，挂一漏万之处恐难避免，敬请见谅。

在本书出版过程中得到了中国水电顾问集团北京勘测设计研究院蒋遼超博士，关李海工程师的大力支持，在此表示衷心的感谢！

对于地下埋藏式岔管考虑围岩分担内水压力设计的认识，仍在不断加深之中，受水平所限，不妥之处恳请专家与读者谅解和指正。

王志国

2011年5月于北京

目 录

序 前言

1 概述	1
1.1 国内外研究现状和水平综述	1
1.2 项目研究由来和解决的问题	2
1.3 研究的技术路线和方法	3
1.4 主要研究成果	3
1.5 社会效益和推广应用价值	6
2 内加强月牙肋岔管受力特点	7
2.1 管壳受力特点	7
2.2 加强肋受力特点	8
3 月牙肋岔管布置	11
3.1 布置型式选择	11
3.2 合理确定岔管规模	14
4 内加强月牙肋岔管水力特性及参数选择	17
4.1 水力模型试验应注意的问题	17
4.2 分流比对月牙肋岔管水力特性的影响	19
4.3 分岔角选取及其对月牙肋岔管水力特性的影响	20
4.4 扩大率及锥角对月牙肋岔管水力特性的影响	23
4.5 肋宽比对月牙肋岔管水力特性的影响及选择	27
4.6 小结	33
5 月牙肋岔管结构分析	35
5.1 应力控制标准	35
5.2 结构分析方法	35
5.3 月牙肋岔管体形优化	37
5.4 围岩分担内水压力结构分析	45
5.5 小结	59
6 现场结构模型试验研究	60
6.1 岔管模型试验设计	60

6.2	焊后残余应力测试	69
6.3	明岔管现场结构模型试验	70
6.4	埋管状态现场结构模型试验	83
6.5	埋管与明管状态下岔管结构模型试验比较	101
6.6	小结	106
7	已建工程月牙肋岔管围岩分担内水压力分析	108
7.1	十三陵抽水蓄能电站岔管观测资料分析	108
7.2	日本奥美浓抽水蓄能电站岔管	113
7.3	日本奥矢作第一抽水蓄能电站岔管	115
7.4	小结	116
8	埋藏式岔管结构设计	117
8.1	埋藏式岔管的设计原则	117
8.2	埋藏式岔管设计参数选取	118
8.3	设计步骤	119
8.4	工程实例	119
8.5	小结	135
9	钢材选择	136
9.1	层状撕裂产生机理	136
9.2	层状撕裂的影响因素及防止措施	136
9.3	层状撕裂评定标准	138
9.4	岔管肋板 Z 向性能评价	139
9.5	小结	140
10	水压试验	141
11	构造要求及工程措施	142
12	安全监测	145
12.1	埋藏式岔管安全监测设计特点	145
12.2	埋藏式岔管安全监测设计实例	145
	参考文献	148

1 概 述

岔管是一管多机供水布置方式的重要组成部分,根据所采用材料的不同,可分为混凝土或钢筋混凝土岔管和钢岔管。混凝土或钢筋混凝土岔管充分利用围岩的承载能力,大部分甚至绝大部分内水压力由围岩承担,从一定意义上讲混凝土或钢筋混凝土岔管实际上是一种平整衬砌,是一种较为经济的衬砌型式,但其对围岩条件要求较高。当围岩地质条件较差、覆盖层不足,不适合采用混凝土衬砌时,往往采用钢岔管。钢岔管从结构型式上可分为:球形岔管、三梁岔管、贴边岔管、无梁岔管、内加强月牙肋岔管等,从国内外已建大型工程钢岔管型式分析,大型钢岔管型式主要是:三梁岔管、球形岔管和内加强月牙肋岔管。由于内加强月牙肋岔管具有受力明确合理、设计方便、水流流态好、水头损失小、结构可靠、制作安装容易等特点,在国内外大中型常规和抽水蓄能电站地下埋管中得到广泛的应用。

1.1 国内外研究现状和水平综述

内加强月牙肋岔管也称为 E-W 型岔管,是由瑞士 Escher wyss 公司开发的,进入 20 世纪 70 年代后,我国不少常规水电站采用了此种类型岔管,取得很好效果,但岔管规模都不大。随着我国西部水电开发和大型抽水蓄能电站的建设,高压岔管向高水头大 HD 值方向发展。如何减少钢板厚度,降低制造和安装难度,增加技术可行性,成为比较突出的问题。

从目前内加强月牙肋岔管规模(HD)统计资料看,见图 1.1,我国完建最大规模的月牙肋岔管为十三陵抽水蓄能电站岔管,最大 HD 值达 $2599\text{m}\times\text{m}$,是由北京勘测设计院设计,日本三菱重工神户造船厂制造的。在建的为西龙池抽水蓄能电站岔管,其 HD 值为 $3552.5\text{m}\times\text{m}$ 。此种类型规模最大的岔管当属日本的葛野川和今市抽水蓄能电站,这两个岔管均在 HD 值分别为 $4720\text{m}\times\text{m}$ 和 $4565\text{m}\times\text{m}$,今市抽水蓄能电站岔管主管最大钢板厚度为 100mm ,为降低制造、安装难度,采取了不少措施,如岔管主体采用对称布置,以减少侧向弯曲应力,达到减少管壳厚度的目的;肋板采用加强桁以减少其厚度等。

国内外埋藏式岔管常按明管设计,围岩分担内水压力仅作为一种安全储备,这不仅是由于岔管距厂房较近,按明管设计趋于安全,更主要的是没有一种恰当的设计理论、方法和成功的经验。对于大 HD 岔管考虑围岩分担内水压力,减小钢板厚度的意义不仅仅在于节约钢材用量,更重要的是降低岔管制造、安装难度。以往有些工程也不同程度地考虑围岩分担内水压力的潜力,如以礼河三级电站斜井式调压井的分岔结构,是埋藏式三梁钢岔管,按明管设计加劲梁,尺寸庞大,设计采用工程类比方法考虑围岩分担内水压力,减

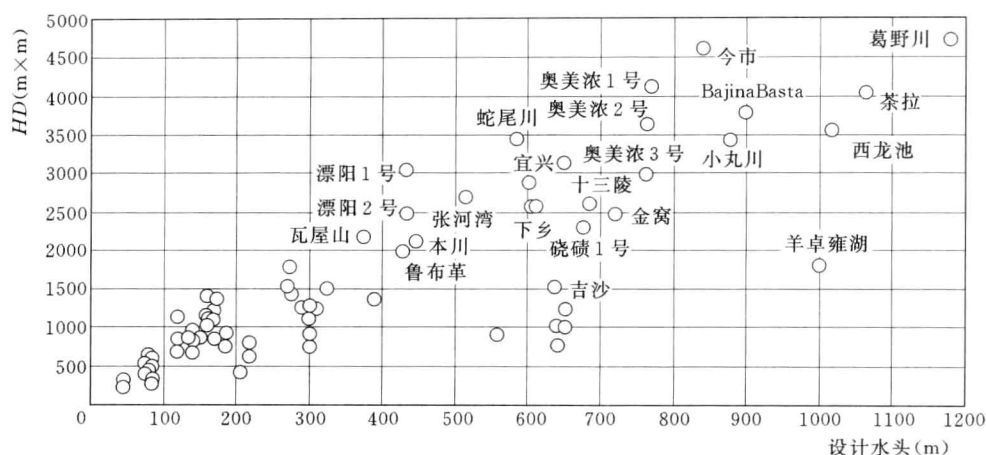


图 1.1 部分已建内加强月牙肋岔管规模 (HD) 统计图

小了加劲梁尺寸；渔子溪一级电站三梁岔管，设计考虑岔管位置围岩地质条件较好，假定围岩分担 15%~30% 的内水压力，这一经验作法被纳入《水电站压力钢管设计规范（试行）》（SD 144—85），通过提高 10%~30% 允许应力的方法来间接地反映围岩分担内水压力的作用。在岔管的实际运行状态下，内水压力是通过变形协调，实现围岩与钢管管共同分担的。通过我国的十三陵、日本的奥美浓、奥矢作第一等抽水蓄能电站内加强月牙肋岔管原型观测资料分析发现岔管应力水平并不高，比明岔管水压试验应力低得多，证明围岩分担内水压力的作用是明显的。关于围岩分担内水压力的作用目前仅处于探索阶段，如何考虑围岩分担内水压力的作用，目前还没有较成熟的方法。

由于日本大型抽水蓄能电站比较多，在 20 世纪 80 年代末，在奥美浓电站的内加强月牙肋岔管设计中，开始考虑围岩分担内水压力的设计。奥美浓电站的 1 号岔管最大 HD 值 4108.5m×m，主管内径 5.5m，这种尝试在世界上也属首例，由于是首次尝试，缺乏经验，设计时围岩分担率限制在 15% 以下，而奥美浓电站的内加强月牙肋岔管的原型观测结果表明，围岩分担率远大于 15%。考虑围岩分担内水压力设计，对于高水头、大 HD 值岔管来说，确实是减少钢板厚度，降低制造、安装难度和工程造价较好的途径。但是，目前国内外埋藏式岔管常按明管设计，没有对埋藏式岔管设计原则做出明确的规定，也无多少可借鉴的经验。

1.2 项目研究由来和解决的问题

西龙池抽水蓄能电站岔管 HD 值达 3552.5m×m，当时远超过国内已建最大规模的十三陵抽水蓄能电站岔管，在世界上也位于前列，如按明管设计，管壳和肋板厚度较厚，从而使岔管制造、安装难度较大，技术可行性成为设计关注的主要问题之一。为降低岔管制造、安装难度，尝试考虑围岩分担内水压力设计，早在 1998 年可行性研究阶段就采用有限元方法，对影响围岩与岔管联合作用的主要因素缝隙值和围岩弹性抗力系数进行了尝试性的分析，初步了解围岩分担内水压力的规律。北京勘测设计研究院从事大型抽水蓄能电

站勘测设计较多,大型钢岔管设计具有较多成熟的经验,为更系统研究埋藏式内加强月牙肋岔管,申请了原国家电力公司 2001 年度科技项目,并于 2002 年 5 月通过立项申请,7 月正式立项。

该课题从岔管水力特性与结构特性两方面进行系统研究,主要有如下研究内容。

(1) 内加强月牙肋岔管水力特性研究及体形优化。通过水力数值计算和水力模型试验对岔管水力特性进行研究,分析分岔角、肋板宽度、扩大率等主要体形参数对岔管水力特性的影响;再通过有限元结构分析,综合确定岔管最优体形,并对体形优化设计方法进行总结。

(2) 内加强月牙肋岔管围岩分担内水压力技术研究。依托西龙池抽水蓄能电站工程,通过三维有限元进行内加强月牙肋岔管与围岩联合作用的结构分析、对已建工程原型观测成果进行分析研究等方法,总结埋藏式岔管围岩分担内水压力规律,并通过现场结构模型试验进行验证。提出内加强月牙肋岔管围岩分担内水压力的设计方法和一般原则,同时将研究成果应用于西龙池抽水蓄能电站、张河湾抽水蓄能电站的岔管设计中。

1.3 研究的技术路线和方法

科研工作是在总结前人经验基础上进行的,具体有如下技术路线。

(1) 通过调查、研究并对国内外已建工程内加强月牙肋岔管设计、原型观测、运行资料以及有关内加强月牙肋岔管科研成果等进行分析,总结内加强月牙肋岔管设计、施工经验。

(2) 通过水力数值计算、水工模型试验等方法,对影响内加强月牙肋岔管水力特性的体形参数进行深入研究;再结合有限元结构分析,从内加强月牙肋岔管水力特性和结构特性两方面综合优化岔管体形,给出影响内加强月牙肋岔管水力特性体形参数的明确界限,并总结出内加强月牙肋岔管体形优化的方法。

(3) 通过对已建工程原型观测资料分析、有限元结构分析、现场结构模型试验,研究内加强月牙肋岔管围岩分担内水压力规律,总结一套适用性较强的内加强月牙肋岔管考虑围岩分担内水压力的设计方法,并对围岩分担率界限提出建议。

(4) 利用已取得的科研成果,进行西龙池、张河湾埋藏式岔管设计,将科研成果应用于实际工程。

1.4 主要研究成果

通过对内加强月牙肋岔管水力特性、围岩分担内水压力规律研究,总结出内加强月牙肋岔管体形参数对水力特性的影响规律、体形优化的原则、月牙肋岔管与围岩联合作用的规律等。主要有如下研究成果。

(1) 内加强月牙肋岔管水力特性的研究成果。

1) 分流比对岔管水头损失系数的影响规律。通过对西龙池抽水蓄能电站岔管分岔角为 75° ,肋宽比分别为 0.5、0.32 方案,以及分岔角为 55° 和 90° ,肋宽比皆为 0.5 的方案,

进行了水力模型试验和数值计算,以及类比国内外已建工程岔管模型试验成果,掌握了分流比对岔管水头损失系数的影响规律。

分流比对岔管水头损失系数的影响很大,当两支管内的水流量不等时,在流量较小的支管内出现漩涡,致使水头损失系数急剧增加。两支管内的水流量相接近时,流动平稳,没有分离及漩涡发生,水头损失系数较小。发电工况,即分流时,水头损失最小值并不发生在分流比为 0.5 时,而是在支管自然出流时的分流比(西龙池抽水蓄能电站岔管 $Q_1/Q_0=0.46$ 左右)时,这主要是由水流的“附壁效应”所引起的;在抽水工况,即合流时,水头损失系数与岔管分流比呈单调递增曲线,在分流比较小时,水头损失为负值,这主要是由于流量分配大的支管的水流处于主导地位,并使另一支管水流加速造成的。

2) 分岔角对岔管水头损失系数的影响规律。通过对西龙池抽水蓄能电站岔管分岔角为 55° 、 75° 、 90° 三个方案水力模型试验与数值计算,以及类比国内外已建工程岔管模型试验成果,基本得出分岔角对岔管水头损失系数的影响规律。

分岔角越小水流流态越好,且能量损失也越小,但两支锥相贯的面积增加,使肋板处不平衡力也随着增大,造成肋板宽度和厚度的增加,进而使水流流线弯曲,产生涡流并使死水区的面积增大,对岔管水头损失产生不利的影响。分岔角越大,水流易与管壁脱离,形成涡流和死水区,使能量损失相应增大,但两支管相贯的面积较小,肋板处不平衡力较小,使肋板宽度和厚度减小,反而使涡流和死水区减少,对减少岔管水头损失有利。采用对称布置的 Y 形岔管,由于肋板与主流方向平行,对岔管水头损失影响较小,分岔角对岔管水头损失系数的影响处于主导地位,岔管的水头损失系数随着分岔角的增大将显著增加;而对于非对称 Y 形岔管,不能忽视肋板宽度的影响。通过西龙池和葛野川水电站研究成果可以看出,从水力特性方面考虑分岔角不宜过大,最好小于 75° 。

3) 扩大率对岔管水头损失的影响规律。内加强月牙肋岔管扩大率从水力特性及结构特性分析,都存在一个最优扩大率的问题。所以在内加强月牙肋岔管设计时,应综合考虑岔管的水力特性和结构特性,合理确定岔管的放大率。扩大率一般在 $115\%\sim 120\%$ 。

4) 肋宽比对岔管水头损失系数的影响规律。通过对西龙池抽水蓄能电站岔管分岔角为 55° 、 75° 、 90° 三个对称布置岔管和 55° “卜”字形布置的体形,不同肋宽比方案进行了系列水力模型试验研究,总结出肋宽比对岔管水力特性的影响规律。

从岔管结构特性分析,肋宽比 β 一般在 $0.2\sim 0.5$ 范围,对于对称布置的岔管,肋宽比在 $0.2\sim 0.5$ 范围变化时,对岔管双机发电工况水头损失影响并不大。单机发电工况,肋宽比对水头损失系数影响较大,但由于引用流量较小,水头损失绝对值并不大。抽水工况,不论单机还是双机抽水,只有当肋板宽度比较适中,即 $\beta=0.25\sim 0.35$ 时,肋板才具有较好导流作用,岔管的水头损失才最小。因此,在岔管结构允许前提下,肋宽比控制在 $0.25\sim 0.35$ 是比较合适的。

5) 水力模型试验中应注意的问题。在实际工程中,岔管雷诺数 Re 一般在 10^7 量级,水流通常处于阻力平方区,而水力模型试验岔管 Re 往往比较小,水流难以进入紊流状态,在进行岔管水力模型试验时,宜尽量选择较大的模型比尺,尽可能使模型水流与原型有较好的相似性。通过对西龙池抽水蓄能电站 75° 分岔角岔管模型的 Re 对水头损失系数 ξ 影响的分析可知,当 $Re>3\times 10^5$ 时,岔管水头损失系数 ξ 基本不受雷诺数 Re 的影响。

(2) 内加强月牙肋岔管围岩分担内水压力技术研究及体形优化。

1) 应力控制原则。目前国内外埋藏式岔管基本按明管设计, 未对埋藏式岔管设计原则作出明确的规定。在参照我国现行的《水电站压力钢管设计规范》(DL/T 5141—2001)、日本《水门铁管技术基准》、美国的 ASME 锅炉及压力容器规范、《钢制压力容器——分析设计标准》(JB 4732—95) 等基础上, 提出对埋藏式岔管应力控制标准的初步建议。

2) 体形优化原则。通过对内加强月牙肋岔管结构特点的分析和三维有限元体形优化成果可知, 岔管的局部膜应力的控制点发生在母线转折处, 在岔管体形优化过程中, 调整各处的母线转折角, 使各处局部膜应力均匀化, 以便材料强度的充分发挥。

埋藏式岔管的应力分布和明岔管相比, 有很大的不同, 因围岩与岔管的联合作用, 岔管的变位受到围岩的约束作用, 使得岔管的各部分应力趋于均匀化, 且数值也明显降低。埋藏式岔管的应力状态对体形参数改变远不如明岔管敏感, 而且在明岔管条件下是较优的体形, 在埋藏式岔管时不一定最合理, 因此埋藏式岔管在考虑与围岩联合作用时, 岔管结构的优化工作应在埋藏式条件下进行。当岔管结构厚度由明管准则控制时, 体形优化应在明管状态下进行。

3) 岔管与围岩联合作用规律。埋藏式岔管与围岩联合作用主要体现在两方面: 一是在受到内水压力作用时, 同地下埋管一样, 围岩分担部分内水压力, 减少岔管所承担的荷载; 二是因岔管结构总体变形不均匀, 由于围岩的约束作用, 限制了岔管变位, 使其变形趋于均匀化, 削减岔管折角点的局部膜应力及弯曲应力。岔管与围岩联合作用条件下, 岔管折角点局部应力的削减是非常明显的。围岩变形特性及岔管与回填混凝土、回填混凝土与围岩的缝隙值是影响岔管与围岩联合作用的主要因素, 围岩弹性抗力系数对埋藏式岔管应力状态的影响呈非线性关系, 而缝隙值大小对埋藏式岔管应力状态的影响尤为敏感。

4) 埋藏式岔管现场结构模型试验研究成果。埋藏式内加强月牙肋岔管现场结构模型试验内容多、难度大、可借鉴经验少, 试验过程中需要解决的关键性技术问题较多, 且投资较大。在我国这一试验是前人一直想做而未能实现的, 在国际上也是首次尝试, 此试验的成功, 标志着我国埋藏式内加强月牙肋岔管设计达到世界领先水平。通过此次试验, 验证了有限元计算成果, 总结围岩分担规律和联合作用机理, 同时也为西龙池抽水蓄能电站岔管设计提供了可靠的依据。

5) 西龙池抽水蓄能电站设计成果。通过对西龙池抽水蓄能电站岔管设计, 对岔管围岩参数的取值及缝隙值的取值原则进行总结并提出初步建议。

西龙池抽水蓄能电站岔管设计水头达 1015m, HD 值高达 $3552.5\text{m} \times \text{m}$, 如按传统设计, 岔管需采用 800MPa 钢板制造, 管壳最大厚度将达到 68mm, 肋板厚 150mm, 岔管制造、安装难度较大。为降低岔管的制造、安装难度, 在体形优化的基础上, 采用围岩分担内水压力设计。在工程地质条件确定后, 影响围岩分担内水压力设计的主要因素是岔管外围总缝隙值的大小, 考虑岔管外围回填混凝土施工特点, 西龙池抽水蓄能电站岔管设计缝隙值水平方向为 0.1cm, 垂直方向为 0.2cm。通过现场模型试验测试成果分析, 模型岔管外围总缝隙平均值为 $3.0 \times 10^{-4} R_0$ (R_0 为岔管公切球半径), 考虑到岔管实际运行过程中, 缝隙值受水温、围岩蠕变等因素的影响, 西龙池岔管缝隙取值是合适的, 也是留有适

当余地的。在岔管围岩弹性抗力系数取值时,考虑了爆破松动区的影响。通过分析与研究证明有限元计算是岔管结构分析行之有效的方法。并提出按“明管准则”限制围岩分担率的建议。通过有限元结构分析,考虑围岩与岔管联合作用后,岔管管壳最大厚度可减少至56mm,肋板厚度减少至120mm。

1.5 社会经济效益和推广应用价值

内加强月牙肋岔管在国内外大中型常规水电站和抽水蓄能电站地下埋管中广泛应用,随着电站向大规模、大容量发展,钢岔管发展也趋向规模化,800MPa级超厚钢板制造、焊接、安装等难度较大,岔管技术可行性成为比较突出的问题。围岩分担内水压力设计是减少埋藏式岔管设计厚度行之有效且经济可行的办法。依托山西西龙池抽水蓄能电站,通过三维有限元结构分析、现场结构模型试验以及对已建工程原型观测资料的分析,总结出内加强月牙肋岔管体形设计方法、埋藏式岔管结构优化的原则、埋藏式岔管应力控制初步原则及埋藏式岔管围岩分担规律,填补了国内空白。此研究成果,将有助于推进我国压力钢管技术的进步与发展。

西龙池抽水蓄能电站岔管如按明岔管设计,需采用800MPa钢板制造,管壳最大厚度将达到68mm,肋板150mm,岔管制造、安装难度较大。考虑围岩分担内水压力设计,岔管壳体厚度可减小至56mm,肋板厚度可减小为120mm。岔管重量减少近22%,大大降低了岔管的制造、安装难度和费用,经济效益是显著的。

采用围岩分担内水压力设计,对高水头、大 HD 值岔管尤为重要,不仅仅是为了节省钢材用量,更重要的是可降低制造、安装难度,增加技术可行性和工程安全度。

埋藏式岔管采用围岩分担内水压力设计在国内尚属首次尝试,国外也仅有日本的奥美浓电站岔管采用围岩分担内水压力设计。本科研究成果填补了我国埋藏式岔管设计空白,同时也使我国大 HD 值岔管技术达到世界领先水平。

2 内加强月牙肋岔管受力特点

内加强月牙肋岔管也称 E-W 型岔管，由瑞士 Escher wyss 公司开发。主管为扩大渐变的圆锥，支管为收缩渐变的圆锥，主锥、支锥公切于一假想球，两支锥相贯的不平衡力由月牙形加强肋承担。岔管设计主要是确定岔管体形和各部分厚度。岔管体形设计时，应使岔管水流平顺，水头损失小；同时减少管壳折角部位的应力集中和肋板所承担的不平衡力，便于材料强度的充分发挥，减少钢材用量。即岔管设计时应兼顾其水力特性和结构特性。

2.1 管壳受力特点

内加强月牙肋岔管由于结构刚度小，肋板在一定程度上可随管壳一起变形，所以次应力较小，管壳大部分呈膜应力状态。管壳厚度主要由折角点应力集中控制。折角点应力可由该点环向应力（膜应力） PR/t 乘以该处的应力集中系数所得，应力集中系数如图 2.1 所示。对于大型岔管，应通过三维有限元结构分析确定管壳厚度。由图 2.1 可见有两种不同折角，一在 A 点，一在 B 点，令其为 β_0 、 β_i ，则该两点不同的形状系数 K_0 、 K_i 为：

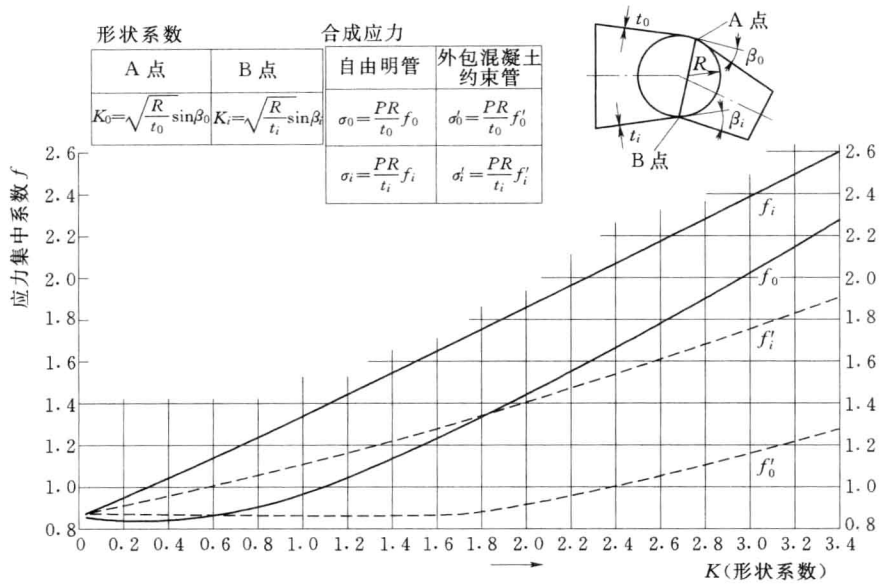


图 2.1 应力集中系数