

中国长江三峡集团公司科技图书出版基金资助

大HD值790MPa钢岔管

大HD值790MPa钢岔管 国产化开发研究与工程应用

毛三军 陈初龙 等◎编著

中国三峡出版传媒

中国三峡出版传媒
中国三峡出版社

大 HD 值 790MPa 钢岔管国产化 开发研究与工程应用

毛三军 陈初龙 等 编著

(节选版)

中国三峡出版传媒

中国三峡出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大 HD 值 790Mpa 钢岔管国产化开发研究与工程应用 / 毛三军, 陈初龙等编著. —北京: 中国三峡出版社, 2017. 6

ISBN 978 - 7 - 80223 - 996 - 8

I. ①大… II. ①中… III. ①储能蓄水-水力发电站-压力钢管-研究 IV. ①TV732

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 142344 号

责任编辑: 祝为平

中国三峡出版社出版发行

(北京市西城区车公庄大街 12 号 100037)

电话: (010) 57082645 57082650

<http://www.zgsxcbs.cn>

E-mail: sanxiaz@sina.com

北京市画中画印刷有限公司印刷 新华书店经销

2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 12.25

字数: 247 千字

ISBN 978 - 7 - 80223 - 996 - 8 定价: 138.00 元

大 HD 值 790MPa 钢岔管国产化 开发研究与工程应用

编 委 会

主 任：毕亚雄
副 主 任：张超然
委 员：毛三军 白和平 王纪卿 林立教 肖 荣 关怀宇
黄丹生 秦锡翔 赵锡锦 牛国强 肖兴恒 高 崖
胡生勇 宋刚云 成 涛 李忠彬 武小兵 彭建国
苏成龙 宋永军
编写组人员：毛三军 陈初龙 曾 辉 伍鹤皋 靳红泽 蒋 勇
刘自成 王 剑 李振中 钱玉英 杜贤军 杨 飞
张伟平 王道斌 王 浩

前 言

抽水蓄能电站的发展已经走过了近百年的历史，尤其是最近 20 年的发展特别迅速，更是向着高水头和大 HD 值方向发展。本书以呼和浩特抽水蓄能电站 790MPa 级高压钢岔管为依托，结合国内外有关钢岔管的工程案例和研究，总结了高水头和大 HD 值 790MPa 级高压钢岔管国产化成果。呼和浩特抽水蓄能电站钢岔管在原材料选材、设计、制造、水压试验等方面创造了诸多国内先例。在此之前，国内高水头水电站的 790MPa 级高强钢岔管几乎全都由国外公司设计与制造，其选用的高强钢板和配套焊材也都是国外产品。

创新是一个民族进步的灵魂，是一个国家兴旺发达的不竭动力。在新的历史时期，我国的制造业正在从中国制造向中国创造迈进，因此必须在新技术、新材料和新工艺上全面突破。中国长江三峡集团公司以振兴民族工业为己任，秉承“中国装备、装备中国”的理念，科学研究和分析了高水头（906m）大 HD 值（4140m·m）790MPa 级高压钢岔管的关键技术及技术难点，依托集团内部和外部专家，对高压钢岔管的设计、制造及运行工况进行了全面调研，组织钢板和焊材生产厂家以及行业相关专家开展技术攻关，通过几年不断磨砺和细致工作，最终突破技术瓶颈，实现了 790MPa 级钢岔管设计、制造、安装和水压试验国产化，打破了高水头钢岔管依赖国外进口的历史，降低了我国重大工程建设和重大装备关键材料对国外产品的依赖，促进了我国重大工程建设和重大装备业的健康发展，为呼和浩特抽水蓄能电站工程节省投资约 3500 万元人民币。

790MPa 级钢材及焊接材料国产化成果可广泛应用于海洋平台、船用

浮吊、大型原油储罐、大型工程机械及钢结构设备、水轮机等重大装备，满足了呼和浩特抽水蓄能电站及后续国家大型工程建设需求，取得了巨大的经济效益和社会效益。

为使本科研成果在相关领域推广应用，中国长江三峡集团公司组织参与钢岔管国产化科研攻关的技术人员在相关技术报告的基础上，补充了相应基础理论，形成了本书。本书的第 1 章和第 8 章由毛三军和陈初龙编写，第 2 章由李振中、钱玉英和杜贤军编写，第 3 章由伍鹤皋编写，第 4 章由刘自成编写，第 5 章由蒋勇和杨飞编写，第 6 章由王剑和曾辉编写，第 7 章由靳红泽和张伟平编写，第 9 章由王道斌和王浩编写。

本书在编写过程中得到了武汉大学、天津大学、三峡大学、中国长江三峡集团公司、中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司、中国水利水电第八工程局有限公司、宝山钢铁股份有限公司、四川大西洋焊接材料股份有限公司、水利部水工金属结构质量检验检测中心等高校、企业和科研单位的支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于受作者水平和经验的限制，本书难免存在缺点和不足之处，恳请读者及专家批评指正。

作者

2017 年 1 月

目 录

第 1 章 项目综述	1
1 工程概况	1
2 高压钢岔管国内、外发展现状	2
2.1 引言	2
2.2 国外发展概况	2
2.3 国内发展概况	3
3 高压钢岔管国产化开发研究与工程应用的背景	6
4 国产化开发研究技术路线	6
4.1 高压钢岔管设计国产化	6
4.2 原材料国产化	7
4.3 岔管制造国产化	9
4.4 水压试验	10
4.5 安装施工技术措施	12
5 小结	12
第 2 章 设计研究与实践	14
1 概述	14
2 主要技术难点	14
3 基本资料	15
3.1 岔管区工程地质条件	15
3.2 地温与水温	16
3.3 钢岔管前后钢管管径、管内流速与最大内水压力	16
3.4 钢材力学性能指标及应力控制标准	16
4 钢岔管设计	17
4.1 设计依据的主要标准和规程规范	17

4.2	岔管位置和型式的选择	17
4.3	钢岔管设计内水压力的确定	18
4.4	钢岔管体型设计	18
4.5	钢岔管三维有限元复核计算	25
4.6	钢岔管水力学研究	36
4.7	岔管制造设计	42
5	钢岔管钢板技术指标确定及材料选择	43
5.1	各国 790MPa 级钢板设计标准对比分析	43
5.2	呼蓄钢岔管 790MPa 级钢板设计指标的确定及配套焊材技术要求	44
5.3	钢板材料的选择	45
6	水压试验设计	46
6.1	水压试验目的及内容	46
6.2	水压试验监测点布置	46
6.3	水压试验要求	46
6.4	水压试验结论	47
7	钢岔管设计的主要技术创新点	47
7.1	钢岔管设计特点	47
7.2	钢岔管设计的创新点	48
8	技术经济比较分析和技術发展方向	48
9	小结	49
第 3 章	钢岔管有限元计算	50
1	基本资料	50
1.1	钢材力学参数及抗力限值	50
1.2	计算荷载及荷载组合	51
2	设计院钢岔管体型	52
2.1	岔管体型设计	52
2.2	岔管体型设计成果分析	52
3	设计院钢岔管方案三维有限元分析	55
3.1	计算假定	55
3.2	计算模型	56
3.3	计算工况	57
3.4	埋管联合承载计算	57

3.5	明管校核工况计算	62
3.6	围岩承载比复核	63
3.7	水压试验工况的计算	64
3.8	实际支撑 8.87MPa 水压试验工况计算	65
3.9	实际支撑 10.35MPa 水压试验工况计算	69
3.10	实际支撑 9.06MPa (设计内水压力) 水压试验工况计算	73
4	影响围岩分担率参数的敏感性分析	76
4.1	围岩弹性抗力系数敏感性分析	77
4.2	初始缝隙值敏感性分析	80
4.3	钢岔管参数	83
5	小结	83
第 4 章	790MPa 高强钢板技术研发与创新	85
1	概述	85
2	790MPa 级高强钢板研发工作的必要性	85
3	790MPa 高强钢板研发工作技术路线	87
4	790MPa 高强钢板研发工作成效	87
4.1	宝钢研发的 790MPa 高强钢板特点	87
4.2	宝钢研发的 790MPa 高强钢板质量特点	94
5	790MPa 高强钢板研发成果关键核心技术	96
5.1	研发技术的创新点	97
5.2	技术成果的先进性	98
6	小结	99
第 5 章	焊接材料开发及应用	101
1	概述	101
2	研究背景	101
3	大西洋 CHE807RH 焊条成果介绍	103
3.1	CHE807RH 焊条功能分析	103
3.2	大西洋 CHE807RH 焊条设计原则	103
3.3	生产过程控制	105
3.4	CHE807RH 焊条工艺研究	106
3.5	CHE807RH 焊条性能	107
4	CHE807RH 焊条研发综合评述	112

4.1 关键技术	112
4.2 成果创新性	112
5 小结	113
第6章 制造安装技术研究与实践	115
1 概述	115
2 钢岔管制造项目概况	115
2.1 材料特性	116
2.2 岔管制造主要特点及难点	117
3 岔管制造关键工艺方案及创新	117
3.1 钻孔法控制厚板切割质量	117
3.2 “五段式”卷制法、立体弧度检测	118
3.3 采用专用调整工具	119
3.4 采用合理方法、工装控制瓦片远距离运输变形	119
3.5 焊接工艺研究的技术路线	120
3.6 采用 Q345R 半球型封头取代常用椭圆型封头	124
3.7 采用封头单面焊双面成型设计	127
4 岔管安装关键工作	128
4.1 安装焊接质量控制关键	128
4.2 安装调整	128
4.3 降低缝隙值的措施	128
5 小结	129
第7章 水压试验及成果	130
1 概述	130
2 试验测试及监测技术特性	130
2.1 主要工作内容和主要技术要求	131
2.2 岔管的基本技术特征	131
2.3 岔管水压试验活动承重支座设计	131
3 测试方案	132
3.1 焊接残余应力测试方案	132
3.2 水压试验应力测试	138
4 水压试验过程安全监测技术	143
4.1 V-STARS 数字摄影测量变形监测方案及成果	143

4.2 声发射技术监测方案·····	145
5 测试监测技术成果及经验总结·····	147
5.1 呼蓄电站 790MPa 高强钢岔管水压试验主要技术成果·····	148
5.2 呼蓄电站 790MPa 高强钢岔管水压试验实践经验及意义·····	150
6 小结·····	152
第 8 章 制造安装质量管理及评价 ·····	154
1 概述·····	154
2 质量管理工作·····	155
2.1 质量管理工作重点·····	155
2.2 制造控制重点·····	158
2.3 水压试验过程质量控制·····	164
2.4 发挥专家技术优势·····	165
3 质量检测成果·····	166
3.1 进厂钢板化学成分和力学性能检验结果·····	166
3.2 岔管外形尺寸检测·····	167
3.3 岔管的焊接质量·····	169
4 岔管永久安全监测工作·····	170
4.1 水道充水期间 1#钢岔管安全监测工作·····	171
4.2 机组甩负荷试验永久安全监测工作·····	172
4.3 施工期以来 1#钢岔管安全监测工作·····	175
4.4 监测成果及评价·····	176
5 质量总体评价·····	177
第 9 章 社会效益和经济效益对比分析 ·····	179
1 国内外同类钢岔管技术质量指标·····	179
2 呼蓄工程钢岔管技术质量指标·····	180
3 经济效益对比分析·····	180
4 社会效益·····	180
5 呼蓄电站高压钢岔国产化开发研究与应用的意義·····	181
参考文献 ·····	183

第 1 章 项目综述

1.1 工程概况

呼和浩特抽水蓄能电站位于内蒙古自治区呼和浩特市东北部的大青山区，距离呼和浩特市中心约 20km。电站总装机容量 1200MW，装机 4 台，单机容量 300MW。电站建成后接入蒙西电网，在电网中担任调峰、填谷、调频、调相以及事故备用任务。电站枢纽主要由上水库、水道系统、地下厂房系统、下水库组成，工程等别为一等，工程规模为大（1）型。

上水库正常蓄水位 EL1940m，死水位 EL1903m；下水库正常蓄水位 EL1400m，下水库死水位 EL1355m。

引水系统采用一管两机布置方式，两条压力管道采用斜井布置，相互平行，主管直径为 5.4m~4.6m，支管直径 3.2m、2m，全部为钢板衬砌。分别在距厂房上游边墙 65m 和 50m 处布置两个高压钢岔管，岔管安装轴线高程 EL1280m。两个岔管体形尺寸完全相同，采用对称“Y”型内加强月牙肋型结构，岔管主管直径 4.6m，支管直径 3.2m，主锥长 1.93m，支锥长 3.91m，公切球直径 5.2m，分岔角 70°，岔管壁厚 70mm，肋板厚 140mm。钢岔管设计内水压力 9.06MPa，采用 790MPa 高强钢板制造，HD 值 4140m·m，是目前国内已建（在建）水电工程中 HD 值最大的钢岔管，其 HD 值和钢板材料等级达到了世界先进水平。岔管壁厚在国内已建的大 HD 值的大型岔管中是最厚的，肋板厚度也达到了第二，肋板厚度国内仅次于山西西龙池抽水蓄能电站的钢岔管。

1.2 高压钢岔管国内、外发展现状

1.2.1 引言

岔管是一管多机供水布置方式的重要组成部分，根据所采用的材料不同，可分为混凝土岔管和钢岔管。钢筋混凝土岔管充分利用围岩的承载能力，内水压力主要由围岩承担，是一种比较经济的衬砌形式。采用钢筋混凝土岔管的抽水蓄能电站较多，但对围岩地质条件要求高。围岩地质条件较差、覆盖层不足，不适合采用钢筋混凝土岔管，这时往往采用钢岔管。

岔管是水电站地下工程的关键部位之一，其结构形状符合水力学原理，受力状态复杂，其结构设计历来为人们所重视。随着高水头深埋藏的大型水电站及蓄能式电站的兴建，钢岔管的规模越来越大，钢岔管的重要性更为突出。内加强月牙肋钢岔管具有水头损失小、受力比较均匀、外部无明显突出构造物、洞室开挖断面较小等优点，进一步研究分析其设计特点、技术评价、焊接材料和施工工艺，对提升相关产业技术领域的科技水平，节省工程投资等有重要意义。

1.2.2 国外发展概况

国外应用较多的钢岔管有三梁岔管、球形岔管及月牙肋岔管，贴边岔管一般用于小孔口补强，无梁岔管是一种新型岔管。贴壁式岔管运用也较少，日本为哥斯达黎加的柯洛比奇电站修建了贴壁式岔管，国内尚无实例，这种岔管适用于非线性多支性分岔管。

近 20 年来，国外尤其是日本使用月牙肋钢岔管规模越来越大，其显著特点是钢管管线布置与岔管形式（支管分岔角）的布置均为对称 Y 型，或管线布置为非对称 Y 型，而主支管分岔布置为 Y 型。这对于大直径、高水头的引水钢管的岔管设计在布置上取得了新的进展。月牙肋岔管已经发展到月牙肋板插入岔管内一定深度而管外露出一定高度的新形式。此种新型岔管使插入岔管内月牙肋板高度减少，外露高度增加，形成月牙肋岔管与三梁式岔管组合的新型管。插入管内深度减少，对岔管内腔水流流态改善有利，外伸部分增加，有利于焊接制造。

国际上，1981 年建成的保加利亚钱拉电站 E-W 形管的 HD 值最大为 $4047\text{m} \cdot \text{m}$ ，肋板厚度 200mm，岔管最大壁厚 85mm，原材料为 80kg 级合金钢。1978 年建成的日本奥矢作第二电站无梁三岔管，最大 HD 值为 $4960\text{m} \cdot \text{m}$ ，球比率 1.46，岔管最大

壁厚 91mm，原材料为 HT80 高强钢。1976 年由川崎重工承建的日本奥吉野电站球岔，最大 HD 值为 3582m·m，岔管壁厚 78mm。

国外抽水蓄能电站大型钢岔管实例见表 1.2.2-1。

表 1.2.2-1 国外抽水蓄能电站大型钢岔管

序号	工程	设计水头 (m)	主管直径 (m)	HD 值 (m·m)	岔管球径 (m)	分岔角	管壳厚度 (mm)	肋厚 (mm)	备注
1	奥矢作 1 [#]	274	6.5	1781	7.8	90°	60	125	日本首例 月牙肋钢岔管 1978 年制造
2	本川	446	4.7	2096	5.7	90°	65、55、 70	140	日本
3	下乡	609	4.2	2559		64°	80	150	日本
4	蛇尾川	584	5.5	3212	6.3	80°	78		日本
5	茶依拉	1065	3.8	4047			93		保加利亚
6	奥美依	770	5.5	4235			88	175	日本 80 年代
7	今市	830	5.5	4565	6.6	74°			埋藏式
8	钱拉	801	3.8	4047		60°	85	200	保加利亚 1981 年
9	葛野川	1180	4.0	4720	4.6		92	135	日本
10	塔贝拉	162	13	2106	13				巴基斯坦 1976 年
11	第二沼	334.8	6	2000.8	/				日本
12	奥清津	654.9	4.0	3401	6.2		75		日本 (1976)
13	奥吉野	833	4.3	3582	7		78		日本 (1976)
14	Cashaic	183	9.144	1673.4	/				美国

1.2.3 国内发展概况

我国钢岔管的发展大致分为以下 3 个阶段：（1）20 世纪 50 年代建造的岔管，由于内压不高，所以一般都是贴边式岔管；（2）60 年代起由于高水头电站的出现，主要是混合梁式和三梁式岔管；（3）70 年代后，随着内压和直径继续增大，逐渐采用内加强月牙肋钢岔管，个别工程采用了无梁岔管。

梁式岔管是国内、外过去普遍采用的成熟管型，可以用于大、中型电站，其加固体系在结构上并不合理，加固梁都以承受弯曲应力为主，材料强度远未被充分利用。“无梁岔管”完全摒弃了笨重的加固梁，而全由壳片组成，尺寸较小，运输、

安装均较方便，能较好地发挥与围岩共同受力的优点，但体形复杂，其设计计算方法还不成熟，国内应用尚少，相应的试验和运行经验也较少，有一些理论问题尚待解决，是一种有发展前途的管型。

我国云南省电力局，昆明勘测设计研究院在有关单位的协助下，做了大量试验研究工作，已经在一些中型水电站上成功地采用了无梁岔管，取得了很大成绩。内加强月牙肋岔管已积累了一定的经验，可用于大、中型电站。贴边岔管在国内中等压力地下埋管中应用较多，已积累了一定的实践经验，可以较好地发挥与围岩共同受力的优点。球形岔管是国外采用较多的成熟管型，目前国内逐渐得到应用，其球径规模，以制造和运输的能力为限。贴壁式岔管是从球岔演变而来的，它将一个圆形主管根据支管的多少和过流量的大小用贴壁分割为若干扇形管，再将扇形管渐变为圆形支管。一般贴壁式岔管由渐扩管、贴壁管、变形管三部分组成。通过定性分析认为，这种形式的岔管分岔灵活，结构对称，无缺省，承受内、外水压力能力强；水流流线接近平行，双向过流条件好，具有广阔的应用前景，比较适合于抽水蓄能电站中的高水头、大直径、深埋藏岔管的运用要求。

月牙肋岔管从 20 世纪 70 年代起至目前为止，是国内采用最多的岔管型式。月牙肋岔管是由三梁式岔管发展起来的一种新型岔管，其结构特点是用一个完全嵌入管体的月牙形肋板代替三梁岔管的 U 型梁，让管壁所受到的水压力作用在月牙板的形心上，按轴心受拉构件确定月牙板的轮廓尺寸，这样可以充分利用钢材的自身抗拉强度。内加强月牙肋岔管与三梁岔管相比，具有应力条件好，制造简单，以及改善水流条件等优点。而且由于外形完整，内水压力易于通过管壁传给围岩或外包钢筋混凝土，有利于钢岔管与围岩或外包钢筋混凝土的联合承载，因此，内加强月牙肋钢岔管比较适用于埋藏式或钢衬钢筋混凝土岔管。月牙肋岔管也存在一些问题，如果月牙肋插入较深，设计不妥，在不对称流态下的水头损失可能较大，月牙肋可能承受较大的侧向压力。月牙肋需要较厚的钢板制造，我国有时供货困难，需用进口钢材。在布置月牙肋岔管时，有时需采用较大的锥管间的折角，这就容易产生较大的应力集中。这些问题，只有精心设计和试验，才能够解决。在我国，其体型设计和应力分析计算较为先进，自 70 年代中期起，在大中小型电站上成功地应用推广了内加强月牙肋钢岔管，取得了一定的成果。1966 年，瑞士爱雪维斯（Escherwys）公司首次研制应用内加强月牙肋钢岔管，故称为 E-W 型岔管。我国首次制作安装和运行的大型 E-W 型岔管（猫跳河五级 2 号岔管），突破了沿用的常规结构工艺，成功地创造了“管壁错缝解体”和“管壁错缝还原”的施工工艺。自 1978 年初运

行以来，未发现异常情况，取得了良好的效果。

钢衬钢筋混凝土岔管国内尚属研究初始阶段，目前建成仅几处，运行时间不长，虽作过一些实验研究工作，但工程经验还不成熟。其设计方法按钢衬与混凝土联合受力的原则进行设计。

总体而言，目前我国各型岔管的应用水平已接近国外同类岔管水平，但具体的工程实际应用水平与国外还有一定差距，国内部分已建岔管见表 1.2.3-1。

表 1.2.3-1 国内已建电站的大型钢岔管

序号	年份	工程	设计水头 (m)	主管直径 (m)	HD 值 (m·m)	岔管球径 (m)	分岔角	壁厚 (mm)	肋厚 (mm)	钢材	抗拉强度 (MPa)
1	2013	呼和浩特	906	4.6	4140	5.2	Y70°	70	140	B780CF	790
2	2008	西龙池	1015	3.5	3552.5	4.1	Y75°	56	150	SHY685NS	780
3	2008	张河湾	490	5.2	2548	5.8	Y70°	52	52	SHY685NS	760~910
4	2003	引子渡	154	8.7	1569	10.2	Y55°	38	80		690
5	1999	广西天湖	1180	1.0	1180	1.25		60	120		
6	1998	十三陵 1#、2#	670	3.8	2546	4.5	Y74°	60	130	HT80	760~910
7	90年代	黄兰溪	560	1.6		1.882	Y75°	30	70		
8	90年代	太平驿	160	6.0	960	6.0	Y60°	25	44		
9	1982	鲁布革	426.6	4.6	1962	5.48	Y60°	42	90	A517	
10	2006	宜兴	650	4.8	3120	5.44	Y70°	60	100	P500M	610~790
11	1980	湖南镇	170	7.2	1224	8.4	Y72°	32	100		

根据抽水蓄能电站的发展趋势，国内抽水蓄能电站也将向装机容量大、设计水头高的方向发展，高水头、大 HD 值高压钢岔管的设计、制造将成为普遍面临的问题。790MPa 高韧性调质钢板主要用作制造水电钢岔管、涡壳与压力钢管、海洋平台、巨型工程机械、深海耐用壳体等。在本工程实施之前，国内各大钢厂均不能批量生产，国内尚无国产 790MPa 高强钢用于额定水头 500m 以上钢岔管的应用实例及相关报道。

国内抽水蓄能电站 790MPa 高压钢岔管的制造方式主要是国外（特别是日本）整体承包，采用进口钢材和配套的焊接材料，由国外公司进行设计和制造。此前的大型钢岔管如北京十三陵抽水蓄能电站、山西西龙池抽水蓄能电站、河北张河湾抽水蓄能电站、宜兴抽水蓄能电站及目前的江苏溧阳抽水蓄能电站等工程，均采用国外钢材和焊材，由国外厂家制造。

1.3 高压钢岔管国产化开发研究与工程应用的背景

随着水电工程建设向青藏高原等地区扩展及抽水蓄能电站的大规模建设，高水头、大 HD 值电站建设越来越多，并逐步成为行业发展趋势。高水头、大 HD 值水电站工程钢岔管所需的 790MPa 高强度、高塑韧性、低焊接裂纹敏感性、优良的抗层状撕裂和优良的可焊性等特性调质钢板是工程建设的关键性基础材料，但与此不相协调的是，这些关键性基础材料过去均需从国外进口。进口钢板不但价格极其昂贵，而且被附加了许多歧视性条款、用途锁定，受外部因素制约大，严重制约了我国水电工程，尤其是高水头电站及抽水蓄能电站的健康发展，此类钢材实现国产化替代已刻不容缓。

中国三峡集团在工程建设初期，综合借鉴国内外同类工程的建设经验，全面考察了国内钢铁企业的高强钢生产技术发展状况，提出呼蓄电站高强钢材料要全部实现国产化的目标，打破我国水电用 790MPa 级以上高强钢全部依赖进口的局面。

1.4 国产化开发研究技术路线

中国三峡集团公司立项，将“大 HD 值 790MPa 钢岔管国产化开发研究与工程应用”作为重大科研课题，下达给中国三峡集团公司内蒙古呼和浩特抽水蓄能发电有限责任公司。要求在项目开展实施过程的每个环节上，包括岔管的结构设计分析、技术评价、焊接材料和焊接施工工艺、施工过程的质量控制、水压试验测试和过程监测等工程技术领域，全面实行工程设计、高校、科研院所和相关企业的相互协作、共同配合、联合攻关的技术路线。

1.4.1 高压钢岔管设计国产化

设计阶段必须完成的项目为：高压钢岔管体型确定，岔管水力学特性计算分析，明管和埋管状态下有限元计算分析。中国三峡集团公司采取由总工程师牵头，组织设计院和高校联合攻关。由设计院承担高压钢岔管体型设计项目，天津大学承担岔管水力学特性计算分析，武汉大学承担岔管明管和埋管状态下有限元计算分析。

呼蓄电站钢岔管的体型及结构设计是依据工程地质条件和机组运行参数确定的。本工程钢岔管技术设计的特点是：

- (1) 岔管段围岩为新鲜的片麻状黑云母花岗岩和斜长角闪岩，围岩类别以 II 类

为主，断裂发育部位围岩类别为IV类。针对围岩弹性抗力系数及缝隙值进行了敏感性分析，深入研究了岔管区段围岩分担比例。

(2) 对岔管设计体型进行了埋管、明管状态下三维有限元计算，在确保岔管结构安全的前提下，有效地减小了岔管壁厚和肋板尺寸，减小了岔管重量。通过三维有限元计算给出钢岔管水压试验最大内水压力值。

(3) 对岔管设计体型采取水力学数值模拟计算，对岔管部位的流态、漩涡、气囊、流速分布及水头损失系数等进行了模拟计算，对不同分流比、不同肋宽比情况下岔管的流态及水头损失进行了对比分析，验证了岔管设计体型的合理性。

(4) 为了验证岔管结构的可靠性和安全性，明确水压试验的技术要求。

1.4.2 原材料国产化

根据设计院提出的技术指标，中国三峡集团公司组织相关行业技术专家与有意愿承担研发工作的专业生产厂家进行技术交流。通过对研发团队和生产设备的评估，最后确定由宝山钢铁股份有限公司承担岔管壳板和月牙肋板研发，四川大西洋焊接材料股份有限公司承担岔管焊接材料研发。

(1) 岔管管壁和月牙肋板

呼蓄电站钢岔管钢材特点是抗拉强度高（760 ~ 910MPa）、钢板厚（70mm、140mm），790MPa 高强钢板研发的关键核心技术是满足调质钢板高强度、高韧性、优良焊接性（低预热温度、焊接热输入适应性强、焊接热影响区低温韧性高）、低屈强比、钢板厚度方向强韧性均匀等指标要求。

790MPa 高强钢板研发的技术路线特点是：

①790MPa 高强钢合金元素的组合设计，以合金元素当量替代合金元素含量、综合考虑其他元素对相变过程及晶粒细化贡献的影响，实现超低合金成本、低碳当量、低 P_{cm} 设计。

②790MPa 高强钢采用双重温度递减淬火工艺技术，保证调质钢板，尤其超厚调质钢板表面层为细小均匀的低碳马氏体，钢板中心部位为下贝氏体 + 低碳马氏体，平均晶团尺寸 $\leq 25\mu m$ ，沿板厚方向显微组织细小均匀，实现优良的强韧性、强塑性匹配、低屈强比且沿板厚方向力学性能均匀。

③790MPa 高强钢采用低碳、中微合金钢的成分体系作为基础，适当提高钢中酸溶 Al_s 含量，且 $Al_s \geq (Mn \text{ 当量}/C) \times (N_{total} - 0.292Ti)$ ，控制 $(Mn \text{ 当量})/C \geq 15$ 、 $(Cu + Ni + Mo + Cr)$ 合金化、 $Ni \text{ 当量} \geq 0.90\%$ 、 $Mo \text{ 当量} \geq 0.15\%$ 、 Nb/Ti 控制

在 1.0 ~ 2.5 之间、Ca 处理且 Ca/S 比在 0.80 ~ 3.00 之间且 $(Ca) \times (S) 0.18 \leq 2.5 \times 10^{-3}$ ，控制 DI 指数 $\geq 0.65 \times$ 成品钢板厚度等冶金技术控制手段。

(2) 焊接材料

790MPa 高强钢岔管现场焊接时，在不预热或低预热条件下施工，焊后不采用消除应力的热处理。要求焊缝金属具有优良的抗氢致开裂能力。为防止钢岔管水压试验加压及运行过程中的脆断或塑性失稳断裂，焊缝金属必须具有优良的塑性、韧性和抗脆断能力和止裂能力。针对上述 790MPa 高强钢岔管性能要求、制造过程和使用特点，采取创新的研究开发技术路线，为呼蓄电站 790MPa 高强钢岔管开发出具有高塑韧性、低焊接裂纹敏感性的低合金高强钢焊条 CHE807RH。

① 焊缝金属合金体系设计

CHE807RH 焊条合金体系设计为 Mn - Ni - Cr - Mo 合金体系，同时加入其他微量元素和稀土元素，针对各合金元素的焊接冶金行为及相互关系，使焊接后组织为低碳回火马氏体和低碳回火贝氏体，与 790MPa 高强钢组织成分尽可能相匹配。

② 高碱度渣系设计

提高熔渣的碱度，增强冶金脱 S、P 能力。对于 790MPa 级的高强钢，需严格控制焊缝熔敷金属中的 S、P 含量，才能保证焊接接头具有高韧性和高强塑性。

③ 熔敷金属扩散氢含量的控制措施

对某些原辅材料进行特殊处理，降低焊条药皮的结晶水含量；加入多种碳酸盐、氟化物等提高脱氢能力；加入稀土元素，提高药皮抗潮能力等办法，使熔敷金属扩散氢含量小于 4.0ml/100g，取得了良好的效果。

④ 熔敷金属 S、P、O、N 等杂质元素的控制措施

通过精选杂质元素含量低的矿物粉、铁合金及焊芯来进一步控制杂质元素的含量。

⑤ 焊条工艺性设计

焊条工艺性设计要保证具有良好的全位置操作性，良好的抗气孔敏感性。采用碱性低氢型药皮渣系，通过研究实验，科学合理地调整各种矿物原料的配比，使熔渣在高温下具有良好的流动性及一定的高温黏度。研究实验萤石、大理石的比例，得到了良好的药皮套筒及细小的熔滴过渡，电弧稳定性好，吹力大，全位置操作性好，焊缝成形美观。

⑥全位置焊接性的研究

在横、立、仰焊时，金属受重力影响较大，熔渣不易控制，成型困难，易产生裂纹、焊瘤、未焊透及夹渣等焊接缺陷。改善全位置焊接性，除了通过操作手法和焊接规范的控制外，在配方设计时还应使熔渣具备适合于全位置焊接的物理性质。通过试验，调整配方中大理石、萤石和金红石的含量，使熔渣成为适宜全位置焊接的短渣。提高电弧稳定性和增大电弧吹力，可改善全位置焊接操作性，通过调整萤石和碳酸盐的含量来提高电弧稳定性和增大电弧吹力。

⑦气孔敏感性研究分析及气孔预防措施

焊缝气孔的形成是由于熔池中的气体在金属凝固结晶前未来得及溢出，以致在焊缝金属中（内部或表面）形成了气孔。解决气孔问题的措施是尽量减少气体的数量和降低熔池金属中气体过饱和度，使气泡难以形成。采用低氢药皮，用少量结晶水（或不用含结晶水）的原材料，将水分和氢的来源控制到最低限度，避免形成气孔。

1.4.3 岔管制造国产化

中国三峡集团公司通过调研已建和在建工程岔管的制造质量、技术指标、国内外岔管制造的技术手段和制造设备能力以及国内岔管制造能力，采取由国内公开招标的方式择优选择制造单位，最后确定由中国水利水电第八工程局有限公司承担制造任务。

国产 790MPa 高强度钢板、壳板厚 70mm，国内领先。呼蓄电站钢岔管卷板最小半径为 1600mm，卷板成型存在很大的技术难度。月牙板板厚 140mm，控制焊接变形难度较大，月牙肋与岔管本体的组合焊缝长 9m，焊接量高达 800kg，焊接过程中拘束应力高，焊接施焊稍有不慎，极易把月牙肋从板厚中部拉裂。岔管分成瓦片或小节运输，必须做好瓦片的防变形保护措施。岔管设计内水压力达 9.06MPa，水压试验压力 9.06MPa 国内罕见，水压试验封头的选用与设计是关键技术难点。封头与钢岔管的焊接为 500MPa 级材料与 790MPa 级材料焊接，并且存在单面焊双面成型，焊接难度大，岔管现场整体组装、焊接以及水压试验环境恶劣，大风、大雪天气频繁，特别是岔管整体焊接以及水压试验时环境气温低于 -18°C ，对岔管焊接、水压试验都造成极大影响。

790MPa 高强度钢岔管制造关键工艺技术创新点：

(1) 钻孔法控制厚板切割质量

岔管瓦片及月牙肋均采用数控切割机切割下料，半自动切割机制备坡口。岔管

本体达到 70mm 厚，月牙肋板 140mm 厚，为保证切割质量，数控切割下料前进行喷粉检查，检查合格后进行预钻孔，以保证岔管构件下料的切割质量。

(2) “五段式”卷制法

为保证瓦片卷制成型质量，岔管瓦片采取“五段式”卷板方法进行卷制，并采用立体样板检查弧度，以避免因岔管锥度导致样板倾斜带来的人为操作偏差。

(3) 采用专用调整工具辅助组圆、组装

专门设计工装卡具用于钢岔管制造过程中的焊接接头调节，不产生影响焊缝性能的意外因素。

(4) 设计专用运输工装卡具

岔管分为多个瓦片在厂内预装，成型后解体，发往工地进行二次组装，焊接成型。为防止瓦片在运输过程中发生变形，专门设计运输工装卡具，使岔管瓦片在运输过程中保持稳定，避免岔管瓦片的运输变形。

(5) 采用最佳匹配的焊材及焊接工艺参数

根据国产 790MPa 高强钢板的性能及成分，采用不同的焊材进行焊接试验及焊接工艺评定，得出最佳配对焊材及焊接工艺参数。

1.4.4 水压试验

为检验高压钢岔管设计、原材料、制造质量，对水压试验的应力测试项目，中国三峡集团公司明确：为确保呼蓄工程国产化高压钢岔管运行的稳定，在满足规程规范的基础上，对理论计算的高应力区、已建和在建工程高压岔管出现过的高应力区必须进行应力测试，水压试验内水压力逐步提高，对中间结果组织技术专家进行评估。为确保水压试验过程中国产高压钢岔管的安全，采用国际上最新的声发射监测技术对水压试验全程进行监测。

(1) 验证了工程设计、结构计算数据的符合性

通过岔管水压试验工况的有限元分析计算，岔管最大 Mises 应力在主锥管节顶点处。试验压力 9.06MPa，计算结论：最大 Mises 应力 520MPa，最大径向位移 12mm。水压试验加载升压过程中，测试数据验证了主锥管节顶点处最大应力区应力幅值变化趋势。

(2) 验证了施工组织设计、工艺参数的正确性、合理性和完善性

呼蓄电站钢岔管的施工组织设计和工艺参数的评定，从材料性能验证开始，对下料卷板、车间预组、现场焊接、闷头设计、整体组装、试验设施等环节，进行了

专家的论证研讨、咨询。施工的过程是一个不断完善、不断改进的过程。从水压试验过程和试验测试数据上判断,钢岔管本体、闷头、组对焊接施工等组织设计的措施是正确的、合理的。同时,通过试验环节,也反映出在确定水压试验配套设备、支撑方式方面的不完善和需要改进提高的环节。

(3) 验证了施工过程质量监督和质量控制的有效性、重要性

在钢岔管的施工质量监督上,实行了监理制度。驻场监理对施工生产条件、人员素质、材料验证、工艺方法、施工环境严格进行了控制,对生产过程中出现的质量缺陷和工艺纪律松懈的状况进行及时纠正,并在关键节点,实施业主单位赋予的权限,达到了预防、监督、控制和改进的目的;采取协调、沟通、信息交流、组织专家研讨会议等多种形式,有力促进了施工组织措施的落实,全面保证了工艺性能和制作质量。

(4) 验证了国产 790MPa 高强钢材料性能指标的先进性、稳定性

呼蓄电站钢岔管采用的材料是宝钢生产的 B780CF 高强钢,钢材性能指标和质量与国外发达国家同类级别的钢材相比,处于同一水平。尤其是具有良好的延伸率指标(保证值 20%),这是钢岔管生产过程中,涉及高强钢厚板的卷板工艺、焊接工艺最关键性的技术指标。当水压试验初次加压到 5MPa 时,岔管个别测点处因存在焊接残余应力使该点过早进入屈服状态,此时按水压试验技术要求,应当结束水压试验,但距工程设计给出的水压试验规定压力 9.06MPa 相差较大。由于材料具备了良好的延伸率指标,充分利用材料的塑韧性储备,采取多次加压卸压,逐步提高水压试验压力的方法,达到了设计水压试验压力值的要求。

(5) 验证了测试方法和测试结果分析的先进性、正确性和准确性

高强钢岔管的焊缝施工质量,主要由两方面的质量评价:一是焊缝无损检测的评价质量,二是焊缝接头力学性能指标的评价。无损检测是直观的,无论采取哪种无损检测方法,依据评定标准,都可以判断焊接施工的质量是否满足规范要求。而且无损检测可以重复、再现检测,具有完善的检测工艺、作业流程和评价规程。焊缝接头的力学性能是隐蔽的,与焊接过程参数运用的正确性、返工次数、瓦片组对、矫形以及约束条件等等有关,一旦岔管焊接成型后,焊缝接头的力学性能参数是不可重复和再现检测的。

因此,水压试验一方面具有验证焊缝成型质量的需求,另一方面且更重要的是通过加载、超载的方式,验证焊缝接头承受极端载荷的能力。这个能力必须通过与试验同步测试的方法,也就是采取水压试验应力测试、变形测试的手段,测出在加

载过程、超载试验的条件下，岔管结构强度、刚度的变化范围和发展趋势。不实施水压试验就施工是一种盲目的施工方法。呼蓄电站水压试验的测试要求及测点布置的设计是合理的、正确的，覆盖了主体结构控制部位和控制点，与有限元结构分析的控制区域是一致的。为了验证水压试验钝化焊接残余应力的效果，采用 X 射线衍射方法对试验前后的焊接残余应力进行了测试。

同时，出于试验的安全考虑，在水压试验加载过程中，实施了声发射监控测试和数字摄影变形观测，有利于加载时对缺陷扩展的判定和保证试验过程的安全性。试验结果表明，呼蓄电站的测试手段先进、方法正确、结果准确。

1.4.5 安装施工技术措施

安装施工是呼蓄电站 790MPa 高强钢岔管技术国产化项目应用实施的最后一个环节，由于在技术、工艺、材料、设备、人员各方面做好了充分准备，安装施工过程中每一个环节都作为关键控制点、精心操作、认真检查、措施到位。安装过程顺利，质量得到了严格控制，为国产 790MPa 高强钢岔管的安装施工积累了成功经验。

1.5 小结

(1) 岔管是一管多机供水布置方式的重要组成部分，根据所采用的材料不同，可分为混凝土岔管和钢岔管。钢筋混凝土岔管对围岩地质条件要求高，当围岩地质条件较差、覆盖层不足，不适合采用钢筋混凝土岔管时，往往采用钢岔管。岔管是水电站地下工程的关键部位之一，其结构形状符合水力学原理，受力状态复杂，其结构设计历来为人们所重视。目前国内抽水蓄能电站 790MPa 高压钢岔管的制造方式主要是国外（特别是日本）整体承包，采用进口钢材和配套焊材，由国外公司进行设计和制造。

(2) 随着抽水蓄能电站的大规模建设，高水头、大 HD 值电站建设越来越多，但所需的 790MPa 级高塑韧性、高焊接性及抗层状撕裂特性的调质钢板等关键性基础材料均需从国外进口。进口钢板不但价格极其昂贵，而且被附加了许多歧视性条款、用途锁定，受外部因素制约大，严重制约了我国水电工程，尤其是高水头电站及抽水蓄能电站的健康发展，大 HD 值高压钢岔管的国产化替代已刻不容缓。

(3) 呼蓄公司依托三峡集团公司水电开发整体科研实力，组织宝山钢铁股份有限公司、四川大西洋焊接材料股份有限公司、相关科研院所和施工企业，联合进行技术攻关，成功实现了大 HD 值 790MPa 钢岔管国产化，结束了高压钢岔管板材依赖进口的历史，是中国三峡集团走科学发展道路、坚持自主创新，大力推动国产化水电装备的重要成果。

第 2 章 设计研究与实践

2.1 概述

设计阶段必须完成的项目有高压钢岔管体型确定、岔管水力学特性分析、明管和埋管状态下有限元计算分析、钢板材料性能指标的确定等。设计的主要任务：一是通过对岔管区段围岩覆盖厚度的复核计算，明确岔管是采用钢筋混凝土衬砌还是采用钢岔管，并结合压力管道布置方式和围岩情况选定岔管采用的型式和布置位置。二是进行岔管体型设计研究，明确岔管体型并进行优化。三是对钢岔管原材料的力学性能、各项技术指标、焊接性能进行研究，为选材提供依据。四是进行岔管制造设计，提出岔管制造分割方案、绘制瓦片展开图并进行坡口设计。五是进行水压试验设计，提出最大水压试验压力值、应力控制标准、水压试验方案和监测方案。

2.2 主要技术难点

呼蓄电站钢岔管国产化设计研究过程中主要存在以下技术难点：

(1) 内加强月牙肋钢岔管由于其体型和结构受力的复杂性，使其成为水道系统设计中的一个关键性问题，对于呼蓄工程如此大 HD 值钢岔管，如何通过优化布置及设计参数，改善应力状态，充分发挥材料强度以及合理考虑围岩分担内水压力来减少钢板厚度，降低制造、安装难度成为比较突出的问题。

(2) 呼蓄工程钢岔管是国内首例采用国产 790MPa 级高强度钢板钢岔管，对于

首次应用国产高强度钢板，化学成分、力学性能指标的确定，成为其成功应用的关键性因素。在充分调研宝钢、舞阳钢铁公司等国内大型钢厂实际钢板生产能力及钢材性能的基础上，对比国标（GB）、欧洲标准（EN）、ASTM 标准、日本工业标准（JIS）并结合呼蓄电站的实际情况，提出了应用于呼蓄钢岔管的 790MPa 钢板各项性能指标。

(3) 为实现钢岔管国内制造，需研究大 HD 值钢岔管的分割制造方案、瓦片展开、焊接坡口型式等，有效解决钢岔管制造过程中的瓦片分割问题，减小施工难度，减少钢材用量，缩短制造周期，节约工程投资。

(4) 为顺利进行钢岔管水压试验验证，需合理确定水压试验最大压力值，全面监测水压试验过程中钢岔管的应力和变形情况，因此需对水压试验监测点布置及各监测点应力控制标准进行深入的研究，确保钢岔管结构安全和水压试验效果。

2.3 基本资料

2.3.1 岔管区工程地质条件

岔管段围岩为新鲜的片麻状黑云母花岗岩和斜长角闪岩，围岩类别以 II 类为主，断裂发育部位围岩类别为 IV 类。上覆岩体厚度约 250m ~ 280m。f54 断层和裂隙密集带（J）在 1 号岔管下游 15m 处切过，断层产状为 NW335 ~ NW340°SW \angle 70° ~ 75°，断层宽度为 0.6m ~ 2m，压扭性，破碎带有断层角砾岩、石英脉、黑云母和片状岩。裂隙密集带（J）产状 NW330°SW \angle 65°，宽度约 6m，裂隙面平直光滑，挤压紧密，无充填，平均间距 2cm ~ 5cm/条，局部 10cm ~ 20cm/条。另有一些裂隙切过岔管区域，产状 NW340°SW \angle 49°，充填岩屑，局部夹有少量泥质，沿裂面有少量滴水。岔管部位的岩石呈微风化至新鲜状态，岩体较完整，岔管位于地下水位以下约 230m。岔管段围岩物理力学参数见表 2.3.1-1 ~ 2。

表 2.3.1-1 岔管段围岩物理力学参数建议值

岩性	天然容重 γ (kN/m ³)	抗剪断参数 砂/基岩		弹性模量 s GPa		变形模量 E。 GPa	
		f'	c' (MPa)	水平	垂直	平行片麻理	垂直片麻理
片麻状黑云母花岗岩 与斜长角闪岩	26.5	1.15	1.15	30-35	30-35	20-25	20-25

表 2.3.1-2 岔管段围岩物理力学参数建议值

围岩类别	坚固系数	单位抗力系数	泊松比	渗透系数	线膨胀系数
	f_k	K_0 (kN/cm ³)	μ	K ($\times 10^{-4}$ cm/s)	b (10^{-5} /°C)
II	6-8	5-7	0.2-0.25	<0.45	0.5-1
IV	1.0-1.5	1.0-1.5	>0.3	>5	0.5-1

2.3.2 地温与水温

2.3.2.1 地温

年平均地温 8.6°C。

2.3.2.2 水温

多年平均水温 5.5°C，进水口前最低水温 0.2°C。水的 pH 值为 7.4~8.6。

2.3.3 钢岔管前后钢管管径、管内流速与最大内水压力

- (1) 钢岔管前后钢管的管径依次为：4.6m、3.2m。
- (2) 钢岔管前后钢管的管内设计流速依次为：7.97m/s、8.23m/s。
- (3) 钢岔管承受的最大内水压力设计值约为 9.06MPa。

2.3.4 钢材力学性能指标及应力控制标准

- (1) 钢种：岔管管壁及肋板材料采用国产 790MPa 级高强度调质钢板。
- (2) 重度： $\gamma_s = 7.85 \times 10^{-5}$ N/mm³；
- (3) 弹性模量： $E_s = 2.06 \times 10^5$ N/mm²；
- (4) 泊松比： $\nu_s = 0.30$ ；
- (5) 线膨胀系数： $\alpha_s = 1.2 \times 10^{-5}$ /°C。
- (6) 钢材的力学性能指标（见表 2.3.4-1）：

表 2.3.4-1 钢材力学性能参数

部位	厚度 t (mm)	屈服点 σ_s (N/mm ²)	抗拉强度 σ_b (N/mm ²)
管壁	≤50	≥685	780~930
	50~100	≥665	760~910
肋板	>100	≥645	750~890

(7) 应力控制标准

应力控制标准在满足钢材抗力限值的同时也应满足明岔管准则，具体见表 2.3.4-2、2.3.4-3。

表 2.3.4-2 钢材的抗力限值 (允许应力)

整体膜应力 (N/mm ²)				局部膜应力 (N/mm ²)				局部膜应力 + 弯曲应力 (N/mm ²)				肋板应力 (N/mm ²)			
正常运行工况		水压试验工况		正常运行工况		水压试验工况		正常运行工况		水压试验工况		正常运行工况		水压试验工况	
明岔管	地下埋管	明岔管	地下埋管	明岔管	地下埋管	明岔管	地下埋管	明岔管	地下埋管	明岔管	地下埋管	明岔管	地下埋管	明岔管	地下埋管
237	265	289	324	321	359	386	432	379	424	463	518	274	307	338	379

注：取焊缝系数 $\varphi = 0.95$ 。

表 2.3.4-3 明岔管准则允许应力控制标准

应力类型	对应岔管部位	允许应力 (MPa)
局部膜应力 + 弯曲应力	相邻管节连接部位内、外壁	631
肋板应力	肋板腰部内缘	612
局部自限性峰值应力	中心点附近区域	722

注：取焊缝系数 $\varphi = 0.95$ 。

2.4 钢岔管设计

2.4.1 设计依据的主要标准和规程规范

- (1) DL/T 5141—2001 《水电站压力钢管设计规范》
- (2) DL/T 5017—2007 《水电水利工程压力钢管制造安装及验收规范》
- (3) Q/HYDROCHINA 008—2011 《地下埋藏式月牙肋岔管设计导则》
- (4) GB/T 985.2—2008 《埋弧焊的推荐坡口》
- (5) GB/T 985.1—2008 《气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口》

2.4.2 岔管位置和型式的选择

岔管位于压力管道下平段，通过对下平段围岩覆盖厚度的复核计算，岔管部位不能满足钢筋混凝土衬砌最小围岩覆盖厚度的要求。结合压力管道选用钢板衬砌的型式，选定岔管采用钢岔管。根据岔管区围岩地质条件，以避开 f54 断层和裂缝密集带 (J) 为原则确定岔管位置，1#钢岔管距厂房上游边墙 65m，2#钢岔管距厂房上游边墙 50m。根据压力管道采用一管两机的布置方式，以及对称 Y 型岔管、内加强月牙肋钢岔管的优点，本工程采用对称 Y 型内加强月牙肋钢岔管。

2.4.3 钢岔管设计内水压力的确定

2.4.3.1 荷载种类及荷载分项系数

表 2.4.3-1 荷载种类及分项系数

荷载分类及名称		荷载设计值 (MPa)	荷载分项系数
内水压力	正常运行工况设计内压 (静水压力 + 水锤压力)	9.06	静水: 1.0 水锤: 1.1
	水压试验工况内水压力	根据三维有限元计算确定	1.0

2.4.3.2 正常运行工况设计内压的确定

通过水道系统和机组水力过渡过程计算, 考虑计算误差和压力脉动等因素, 得到蜗壳进口最大设计内水压力为 900m 水头, 以此水头作为压力钢管末端的最大设计内压, 包括静水压力 (660m) 和水锤压力 (240m)。考虑水锤压力沿压力管道 (调压井至压力钢管末端) 呈线性布置, 并计入荷载分项系数, 得到钢岔管最大设计内水压力为 9.06MPa。

2.4.3.3 水压试验工况内水压力的确定

通过三维有限元计算, 得到满足明岔管水压试验抗力限值的最大内水压力, 用于钢岔管水压试验。

2.4.4 钢岔管体型设计

2.4.4.1 体型初拟

(1) 依据《水电站压力钢管设计规范》和《地下埋藏式月牙肋岔管设计导则》, 并参照类似工程钢岔管体型, 初拟钢岔管的分岔角、腰线转折角、公切球直径、肋宽比等, 按照《水电站压力钢管设计规范》附录 F 的相关公式, 拟定了 3 个岔管体型。

(2) 根据规范相关公式, 按埋管不考虑围岩分担内水压力, 计算 3 个岔管的管壁厚度及肋板厚度。

(3) 考虑围岩分担内水压力, 初步估算 3 个岔管的管壁厚度及肋板厚度。

(4) 根据 3 个岔管体型的尺寸和计算厚度, 选择尺寸和厚度较小的方案作为初拟方案。选出的初拟方案, 按埋管不考虑围岩分担内水压力, 最大管壁厚为 96mm, 按埋管考虑围岩分担内水压力, 最大管壁厚为 80mm。

具体初拟岔管体型见图 2.4.4-1、2.4.4-2, 主要参数见表 2.4.4-1。

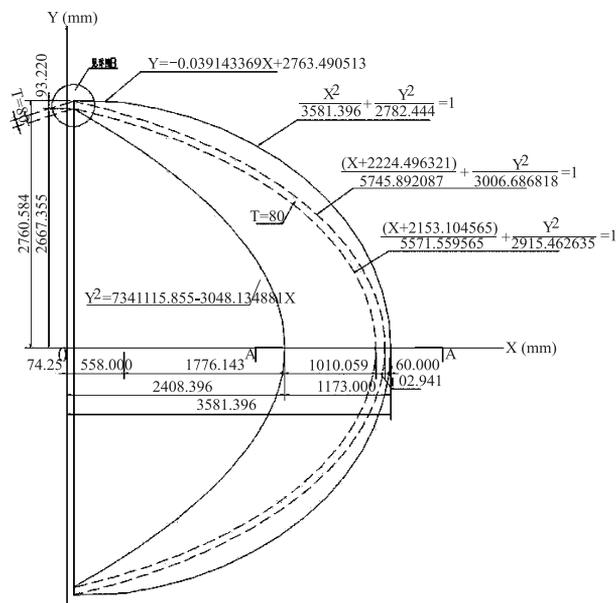
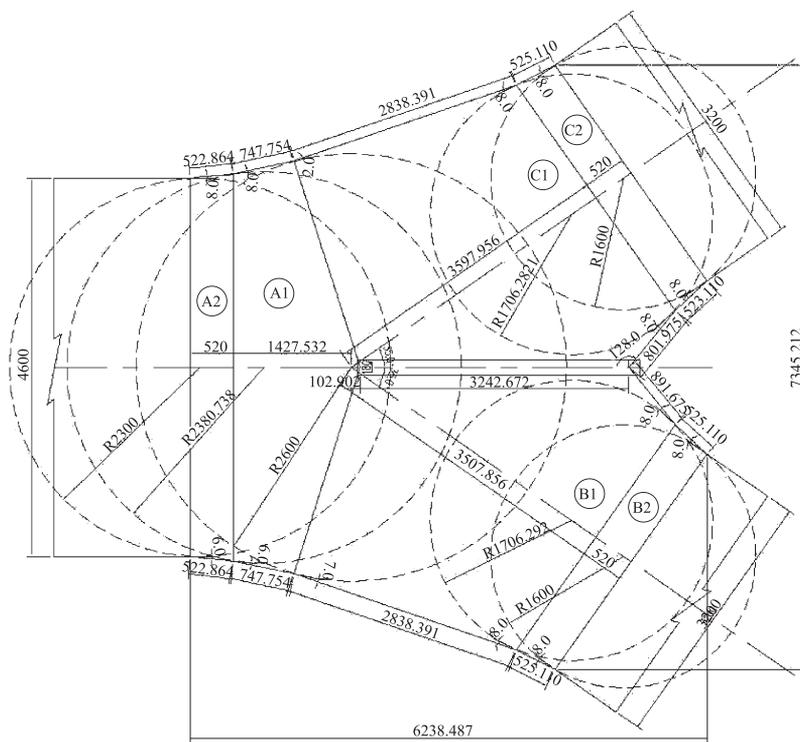


表 2.4.4-1 初拟岔管体型主要参数

项 目		参 数	项 目		参 数	项 目		参 数
主 锥	主管进口内半径 (mm)	2300	支 锥	支管出口内半径 (mm)	1600	肋 板	肋板高 (mm)	2760.5
	相邻主管壁厚 (mm)	68		相邻支管壁厚 (mm)	50		肋板总宽 (mm)	3507
	最大公切球半径 (mm)	2600		最大公切球直半径 (mm)	2600		肋板中央截面 宽度 BT (mm)	1173
	公切球扩大率 (RT/R1)	1.13		过渡管节半锥顶角 (°)	8.0		断面最大宽度/ 肋板高	0.42
	过渡管节半锥 顶角 (°)	6.0		基本管节半锥顶角 (°)	16.0		肋宽比	0.334
	基本管节半锥 顶角 (°)	12.0		最大直径处腰线 转折角 (°)	7.0		肋板厚 (mm)	180
	主岔管壁厚度 δ_1 (mm)	80		支岔管壁厚度 δ_2 (mm)	80		肋板厚/壳板厚	180/80
	肋板与主岔锥 轴线夹角 (°)	0		肋板与支岔锥轴 线夹角 (°)	35		分岔角 (°)	70

2.4.4.2 体型优化

在初步拟定的钢岔管体型尺寸和管壁厚度的基础上，委托浙江大学建筑工程学院进行钢岔管三维有限元计算，对钢岔管的半锥顶角、肋宽比、管壁厚度和肋板厚度进行详细优化。

2.4.4.3 优化原则

(1) 本工程岔管为地下埋藏式钢岔管，在明管及考虑岔管与围岩联合受力的条件下对岔管进行优化。

(2) 保持管壁厚度、肋宽比和肋板厚度不变，调整各个管节的半锥顶角和公切球半径，以进一步降低岔管主管侧关键点的应力不均匀度。

(3) 保持肋宽比和肋板厚度不变，逐步调整岔管管壁厚度，以确定满足允许应力要求的临界管壁厚度值。

(4) 保持管壁厚度和肋宽比不变，逐步调整肋板厚度，以确定满足允许应力要求的临界肋板厚度值。

(5) 保持管壁厚度和肋板厚度不变，调整肋宽比，以确定满足允许应力要求的最优的肋宽比。

2.4.4.4 半锥顶角的优化

在保持管壁厚度、肋宽比、肋板厚度不变的前提下（见表 2.3.4-2）初拟半锥顶角优化方案见表 2.4.4-2：

表 2.4.4-2 半锥顶角优化方案

	A1	A2	B1	B2	C1	C2
方案1 半锥顶角 (°)	12	6	16	8	16	8
方案2 半锥顶角 (°)	12	6	17	8	17	8
方案3 半锥顶角 (°)	12	6.5	17	9	17	9

经过对方案1~3的计算分析可知：(控制点示意图2.4.4-3)

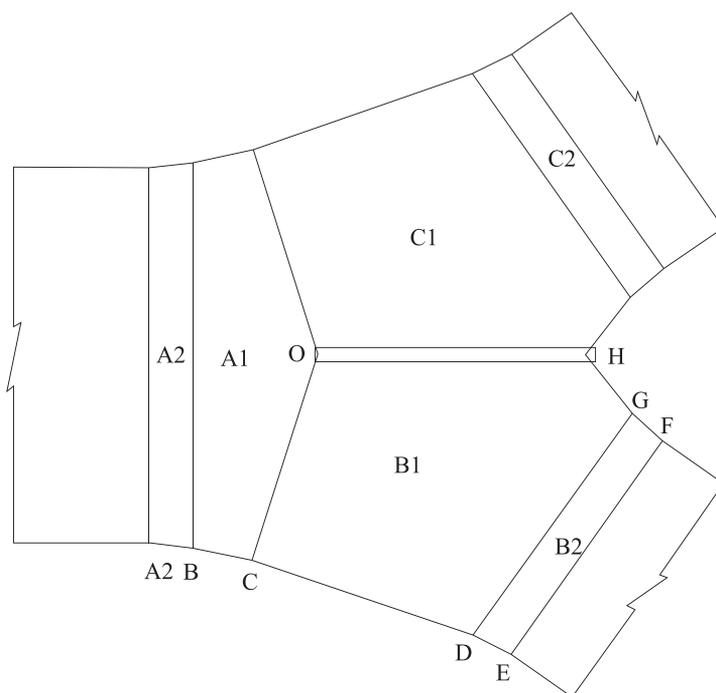


图 2.4.4-3 岔管管壳主要应力控制点示意图

未经中国三峡出版传媒有限公司的书面许可，任何媒体及个人不得转载、摘编该节选内容。违者将被依法追究其侵权责任。

如有需要请购买原版书。



三峡小微

中国三峡出版传媒

中国三峡出版社