

昌波水电站压力管道布置型式选择及结构设计

罗佩玉, 刘朋

(中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要:昌波水电站压力管道连接上游调压室和地下发电厂房,是重要的输水建筑物,其布置型式和结构设计是否合理对电站的安全稳定运行有直接影响。由于受地形地质条件和枢纽布置限制,压力管道线路短且布置空间小,在此基础上对布置型式进行了比选,详细分析了不同布置下水力条件、快速门设计、施工条件以及工程投资等方面的差别,并对选定的布置进行结构设计。相关研究成果可为同类工程提供参考。

关键词:压力管道;布置型式;结构设计;昌波水电站

中图分类号:TV732.4

文献标志码:B

文章编号:1001-2184(2024)04-0095-06

Selection of Penstock Layout Pattern and Structural Design of Changbo Hydropower Project

LUO Peiyu, LIU Peng

(PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang Guizhou 550081)

Abstract: The penstock of Changbo Hydropower Project is an important water conveyance structure connecting the upstream surge chamber and the underground powerhouse. Reasonable layout and structural design are important for the safe and stable operation of the power station. Due to the limitation of topographic and geological conditions and the layout of the hub, the penstock line is short and the layout space is narrow. On this basis, the layout types are compared and selected. The differences in hydraulic conditions, rapid-drop gate design, construction conditions and engineering investment under different layouts are analyzed in detail, and the selected layout is designed. The relevant design results can provide reference for similar projects.

Keywords: Penstock; Layout type; Structural design; Changbo Hydropower Project

1 概述

昌波水电站位于金沙江上游,为金沙江上游干流梯级规划“一库十三级”中的第 11 个梯级电站。电站采用混合式开发,其中引水式电站总装机容量 740 MW,引用流量 $1\,230\text{ m}^3/\text{s}$,额定水头 68 m,厂内安装 4 台单机容量 185 MW 的混流式机组。引水系统采用“一洞一室两机”和“单管单机供水”的布置格局。

两条引水隧洞在调压室底部分别一分为二,分岔为四条压力管道。压力管道内径 9.0 m,采用钢筋混凝土衬砌;考虑到厂房开挖后岩体松弛的影响,为保证厂房安全,距离厂房上游墙 50 m 范围内采用钢板衬砌^[1-2],内径 8.5 m。

2 压力管道布置型式选择

2.1 地形地质条件

沿线出露地层岩性为三叠系中心绒群上段($T_{1-2}\text{zh}^2$)灰绿色绿泥(绿帘)角闪片岩、绿帘石片岩,片理较发育,呈中厚层夹薄层状,根据室内岩石试验,岩石饱和抗压强度为 40~50 MPa,属中硬岩,岩层走向有一定变化,总体产状 $N15^\circ\sim 50^\circ W$,岩层倾 SW,倾角 $27^\circ\sim 65^\circ$ 。

无大区域性断裂切割,但由于距苏洼龙—王大龙断裂较近,小断层、裂隙发育。地表调查,沿线发育的小断层有 f_{c4} 、 f_{c6} 、 f_{c7} 、 f_{c9} 、 f_{c10} 、 f_{c12} 及层间挤压破碎带等,但根据其规模特征推测断层向下延伸有限,断层对洞室稳定影响不大。

裂隙主要发育多组,裂隙密度为 4~5 条/m。以 $N20^\circ\sim 30^\circ E/SE(NW)\angle 40^\circ\sim 60^\circ$ 裂隙最多, $N30^\circ\sim 50^\circ W/SW(NE)\angle 40^\circ\sim 60^\circ$ 及 $EW/N\angle 60^\circ$

收稿日期:2024-05-15

~80°裂隙次之,裂隙面多平直稍粗糙,以硬性结构面为主,充填物多为石英、岩屑及少量铁泥质,近岸坡受卸荷风化影响裂隙面多有泥质充填。

压力管道为地下埋藏式,围岩均为微新岩体,岩性为中厚层夹薄层角闪片岩、绿帘石片岩,层间结合力较差,裂隙较发育,洞室与岩层走向大角度相交,围岩稳定性较好,以 III 围岩为主,小断层及裂隙密集带为 IV~V 类围岩。另外,压力管道洞段位于地下水位之下,岩层陡倾,裂隙发育,开挖过程中存在沿裂隙或层面渗水现象。

2.2 布置型式比选

压力管道一般有竖井式和斜井式两种布置方式^[3],由于地下厂房和上游调压室受地形地质条件限制,布置范围、平面与立面距离、进厂方向已基本确定。上游调压室与地下厂房水平距离约 200 m,且存在平面转弯,可布置压力管道的空间非常有限,若布置斜井,则斜井与平面

转弯段之间几乎没有平段,因此初步选用竖井布置。平面布置情况见图 1。

由于上游调压室底部与厂房机组安装高程之间的垂直高差较小,仅约 46 m,压力管道管段布置紧密,竖井段较短,不利于施工,同时存在 1 号引水隧洞穿 2 号调压室底部时结构干涉问题,导致该处为结构薄弱处。基于上述原因,可考虑压力管道采用缓坡布置,即保证调压室布置不变的前提下,从压力管道起点处以 8% 的缓坡接上游引水隧洞。该布置可解决 1 号引水隧洞穿 2 号调压室底部结构干涉问题,缓坡施工较为便利,但同时也存在调压室阻抗段过长、调压室内闸门井过高、快速门设计制造难度大和不可避免的空间转弯等问题,需进行详细比较。

(1)竖井布置方案。引水线路轴测图(压力管道竖井方案)和引水线路纵剖图(1 号压力管道竖井方案)见图 2、3。

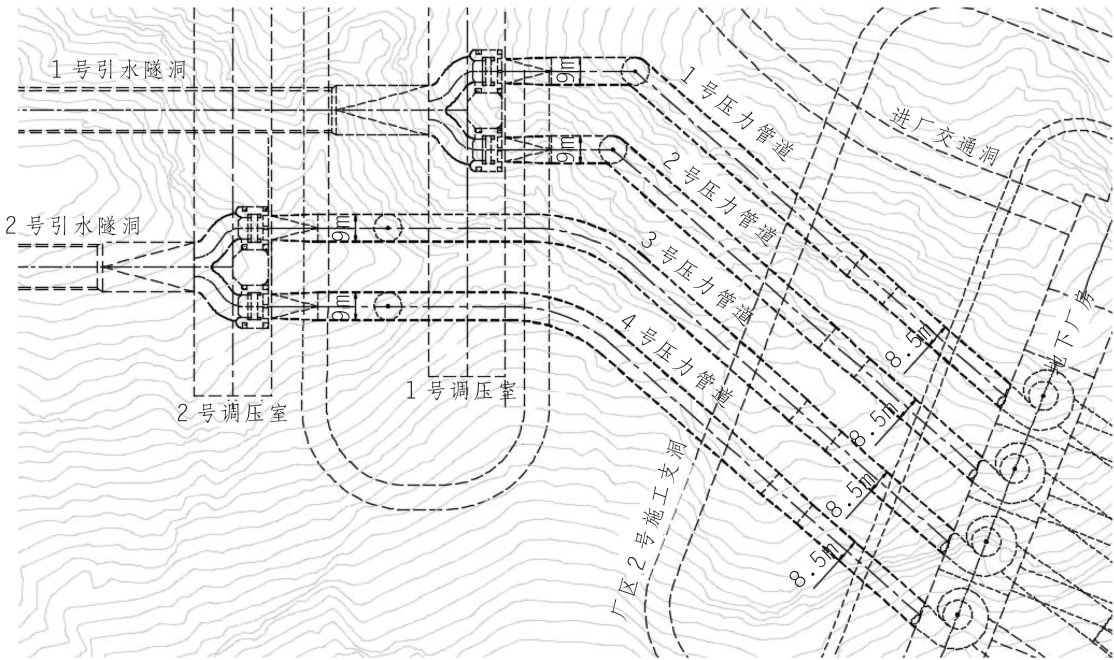


图 1 平面布置图

1 号引水隧洞长度 11 171.10 m,纵坡 1.39‰,引水隧洞进入调压室前通过 30 m 长的渐变段将 $D=13.0$ m 的圆形渐变为 $13.0\text{ m}\times9.0\text{ m}$ (宽 $\times$ 高)的方形,调压室最大室高 102.0 m,闸门井高 99.5 m。调压室后压力管道由渐变段、上平段、上弯段、竖井段、下弯段、下平段以及压力钢管段组成,长度约 236 m。同时,在满足最低涌浪水位与调压室底板高程之间安全裕度的前提下,将调

压室底板上抬后,1 号引水隧洞顶与 2 号调压室底板间结构厚度约 6.46 m,而该处结构可能承受的最大水头约 46 m,结构上能保证安全。

(2)缓坡布置方案。引水线路轴测图(压力管道缓坡方案)和引水线路纵剖图(1 号压力管道缓坡方案)见图 4、5。1 号引水隧洞长度 11 172.87 m,10 824.19 m 前纵坡为 1.39‰,之后以纵坡 8‰接调压室。引水隧洞进入调压室前通过 30 m

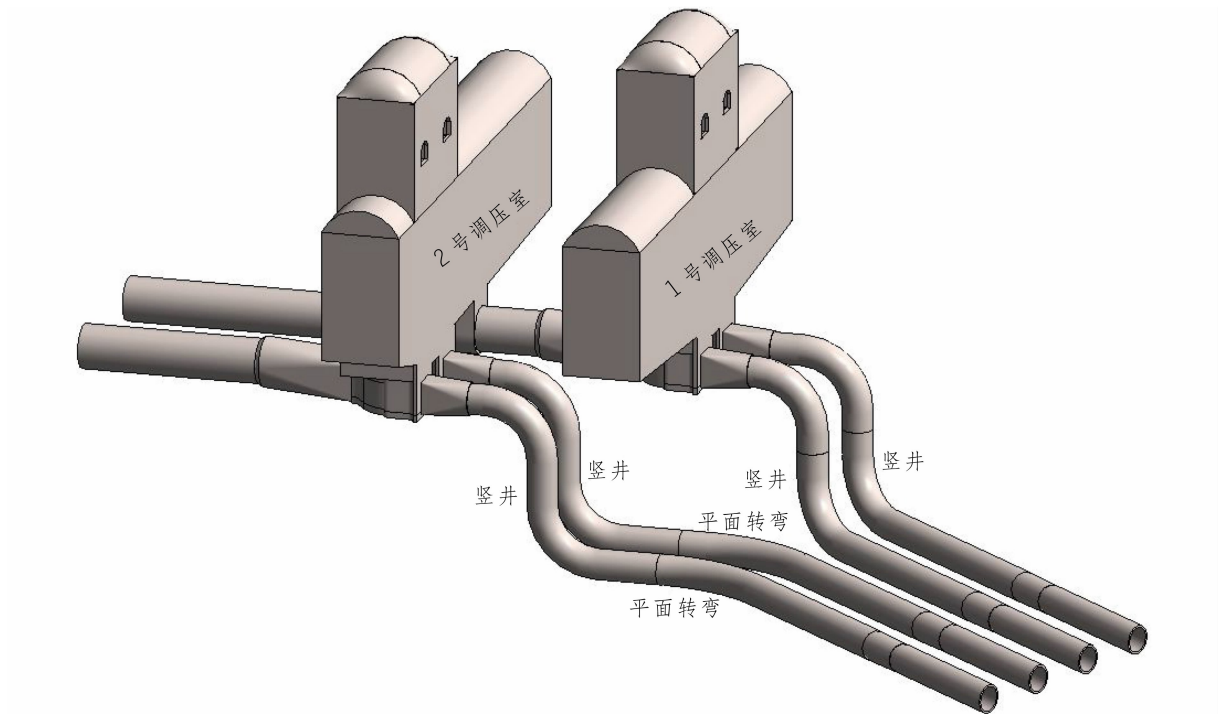


图 2 引水线路轴测图(压力管道竖井方案)

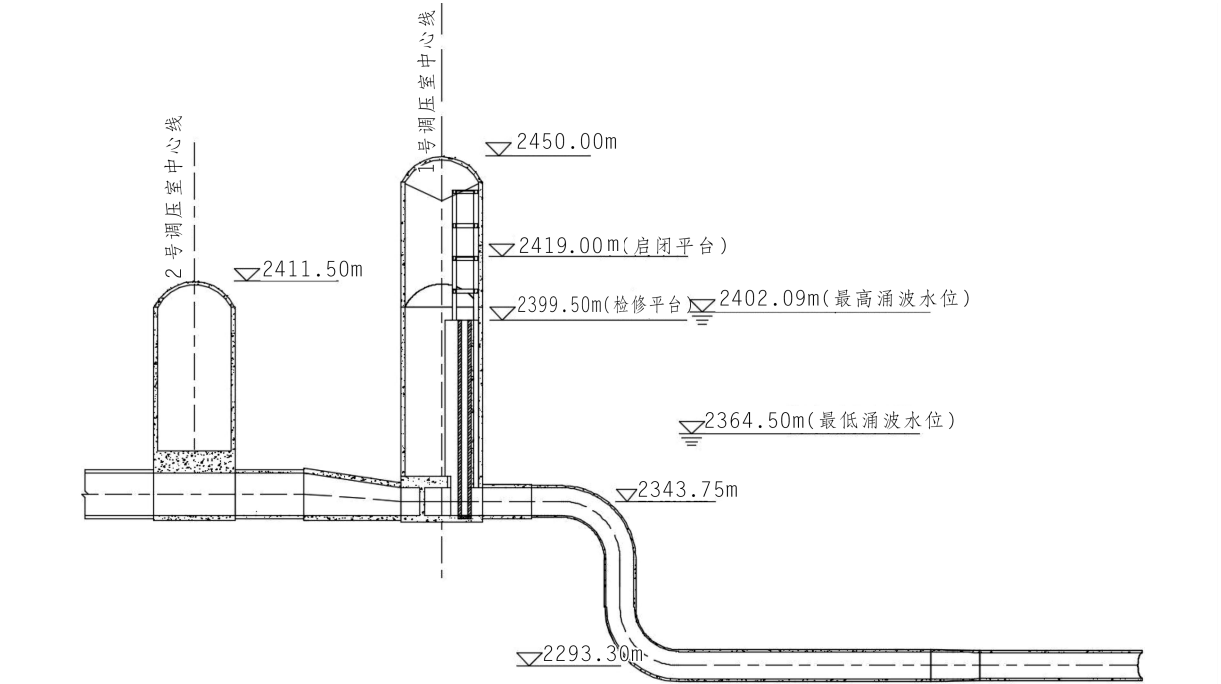


图 3 引水线路纵剖图(1号压力管道竖井方案)

长的渐变段将 $D=13.0\text{ m}$ 的圆形渐变为 $13.0\text{ m}\times 9.0\text{ m}$ (宽 $\times$ 高)的方形,调压室断面与竖井方案一致,但需将分岔段、闸门室以及阻抗板往下接至流道内,水流通过一段高约 39.5 m 的竖井流入调压室内。调压室最大室高 102.0 m ,闸门井高 139.0 m 。调压室后 1 号压力管道以 8% 的缓

坡接钢管,压力管道由渐变段、缓坡段以及压力钢管段组成,长度约 202 m 。

(3)方案比较与选择。从地形地质条件、建筑物布置条件、水流条件、快速门设计、施工条件、工程投资等几方面进行综合比较,压力管道型式综合比较见表 1。

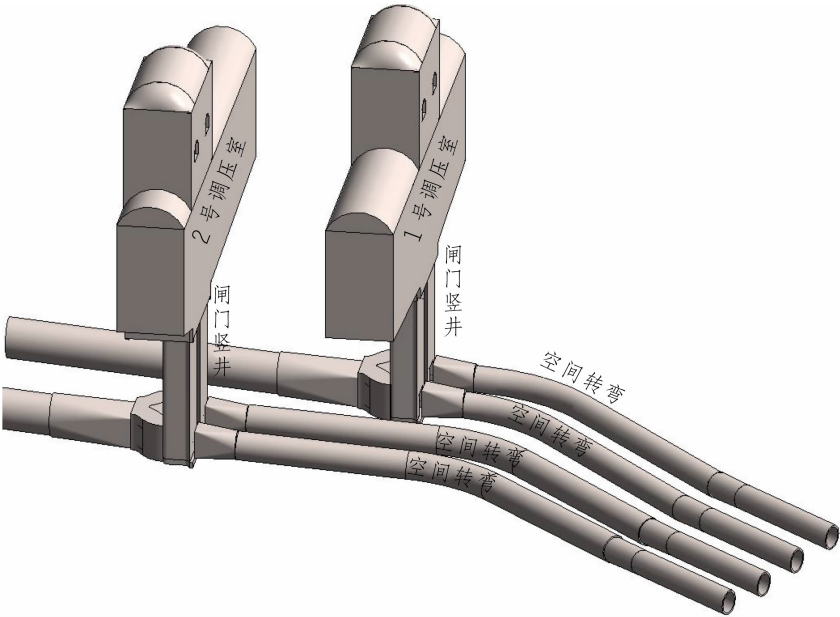


图 4 引水线路轴测图(压力管道缓坡方案)

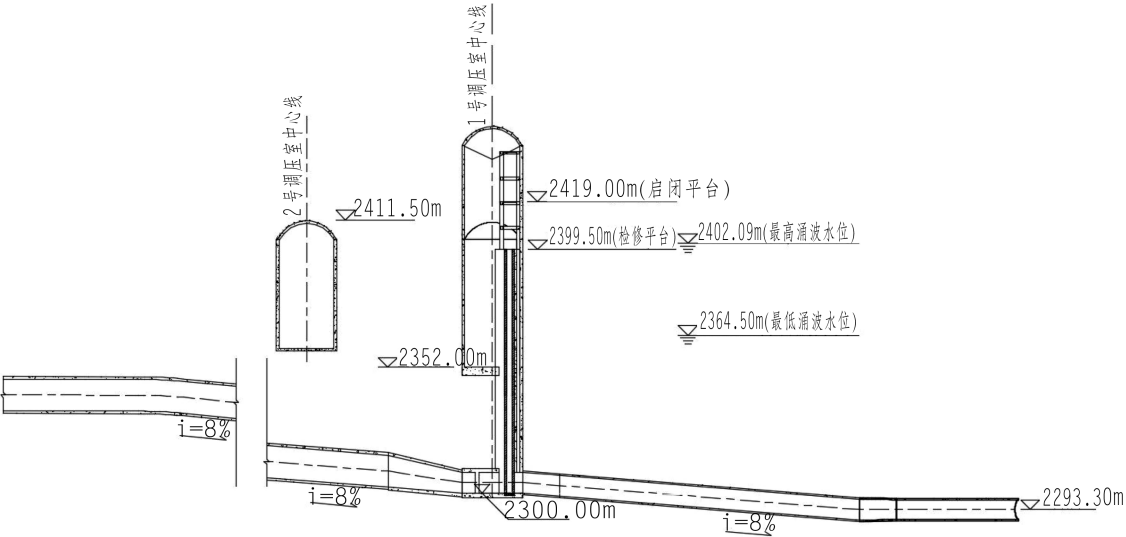


图 5 引水线路纵剖图(1号压力管道缓坡方案)

通过方案比较可以看出:竖井方案闸门室高度较缓坡方案低 39.5 m,水力条件较好,管段布置紧密,利用竖井完成平面转弯,布置灵活,但竖井段施工较为困难;缓坡方案调压室及闸门井均较高,快速门和液压机设计、制造难度大,调压室处水力条件差,压力管道缓坡施工较方便。从工程投资看,缓坡方案引水隧洞长度略长,增加投资约 43 万元;缓坡方案调压室比竖井方案新增一条 39.5 m 长的竖井,两个调压室共增加投资约 5 393 万元;缓坡方案压力管道较竖井方案短约 34 m,4 条压力管道共减少投资约 880 万元,同时可

取消竖井方案中上平段的施工支洞,长约 520 m,减少投资约 2 444 万元。竖井方案较缓坡方案减少投资约 2 111 万元。

通过综合比较,选择竖井式布置方案。

3 压力管道结构设计

3.1 钢筋混凝土压力管道

钢筋混凝土压力管道采用圆形断面,内径 9.0 m,单管引用流量 307.5 m³/s,平均流速 4.834 m/s,采用 C25 钢筋混凝土衬砌,衬砌厚度 0.6 m。按结构力学方法进行配筋计算,衬砌按限裂设计。洞室围岩力学参数建议值见表 2。

表 1 压力管道型式综合比较表

比较项目	型 式		对比结果
	竖井布置方案	缓坡布置方案	
地形、地质条件	压力管道为地下埋藏式,均埋设在 $T_{1-2}zh^1$ 中厚层~厚层夹薄层绿片岩中,岩质较坚硬,裂隙发育。岩层中Ⅲ类围岩约占 90%,Ⅳ类围岩约占 10%。另外,压力管道处于地下水位以下,可能沿裂隙发育带及断层带集中渗水	同竖井方案	相当
建筑物布置条件	调压室最大室高 102.0 m,闸门井高 99.5 m,相对较优。将调压室底板上抬之后,解决了 1 号引水隧洞穿 2 号调压室底部结构干涉问题。压力管道竖井段较短,布置局促,但同时利用竖井完成平面转弯,布置相对灵活	调压室最大室高 102.0 m,闸门井高 139.0 m,较竖井方案不利。压力管道缓坡布置,较竖井方案优	相当
水力条件	上下弯段和竖井处管段布置过于紧密,水力条件略差。调压室处水流通过阻抗孔流入调压室内,为常规情况	压力管道缓坡布置,水流平顺,水力条件好。调压室处水流通过一条高约 39.5 m 的竖井流入调压室,水头损失大,水力条件差,同时可能导致调压室水位波动滞后,影响调节性能	竖井方案优
快速门设计	快速门挡水水头约 65 m,金属结构规模、设计难度、制造难度适中	快速门挡水水头超过 100 m,闸门规模较大,液压机持住力将达到 12 500 kN,闸门和液压机设计、制造难度较大。且由于拉杆较长,检修维护难度较竖井方案大	竖井方案优
施工条件	压力管道管段布置紧密,竖井段较短,施工难度大,且上平段需布置施工支洞	压力管道采用 8%的缓坡与隧洞相接,施工较为方便,可取消竖井方案中上平段施工支洞	缓坡方案略优
工程直接投资 (引水隧洞、调压室、压力管道和施工支洞)	323 651 万元	325 763 万元	竖井方案优
比较结论	推荐方案	比较方案	

表 2 洞室围岩力学参数建议值表

地层岩性	风化程度	围岩类别	单位弹性抗力系数 (MPa/m)	坚固系数	变形模量 /GPa	弹性模量 /GPa	泊松比
$T_{1-2}zh^2$ 中厚层夹薄层状绿帘石片岩、角闪片岩	弱风化	Ⅳ	2 000	3	6	10	0.25
	微新	Ⅲ	4 000	5	10	17	0.22
$T_{1-2}zh^2$ 薄层状绿帘石片岩	微新	Ⅳ	2 000	3	6~8	10~14	0.25

(1)计算工况	端水锤压力,上平段内水压力约 0.74 MPa,下平段内水压力约 1.33 MPa。
①运行期工况	②外水压力
自重+山岩压力+内水压力+外水压力(正常蓄水位)	外水压力考虑调压室内水外渗的影响,取调压室最高涌浪水位,施工期与运行期工况不计外水压力,检修工况外水考虑一定的折减,折减后约 0.63 MPa。
自重+山岩压力+内水压力+外水压力(校核洪水位)	③山岩压力
②施工期工况	山岩压力参照《水工建筑物荷载标准》GB/T 51394—2020 ^[4] 中薄层状及碎裂、散体结构的围岩压力计算公式。
自重+山岩压力+外水压力+灌浆压力	④结构自重
③检修期工况	按钢筋混凝土衬砌体积与重度计算,钢筋混
自重+山岩压力+外水压力	
(2)荷载取值	
①内水压力	
内水压力考虑调压室涌浪水位与压力管道末	

凝土重度取 25 kN/m³。

⑤灌浆压力
灌浆压力取 0.3 MPa。

(3)计算结果

经计算,上平段控制工况为运行期工况,竖井段和下平段控制工况为施工期工况。钢筋混凝土压力管道结构计算成果见表 3。

3.2 压力钢管

表 3 钢筋混凝土压力管道结构计算成果表

部位	衬砌厚度 /m	最终选筋		分布筋	备注
		内 侧	外 侧		
上平段	0.6	Φ20@200 mm	Φ20@200 mm	Φ16@200 mm	内外侧各布一层
竖井段	0.6	Φ22@200 mm	Φ22@200 mm	Φ20@200 mm	内外侧各布一层
下平段	0.6	Φ28@200 mm	Φ28@200 mm	Φ20@200 mm	内外侧各布一层

压力钢管内径 8.5 m,平均流速 5.419 m/s,全线采用正火热轧 Q355C 钢,屈服强度为 345 MPa。

下平段,按埋管设计,不考虑围岩共同承载,由钢管承担全部内水压力。

(1)计算原则及假定

①压力钢管理管段按照《水电站压力钢管设计规范》NB/T 35056—2015 附录 B 的地下埋管结构分析方法进行结构计算和抗外压稳定验算。

②考虑到钢衬段围岩受管道和地下厂房洞室开挖影响,钢衬起点至厂房上游侧 20 m 下平段钢衬按地下埋管设计,内水压力由钢管、回填混凝土和围岩共同承担,厂房上游侧 20 m 范围内的

③1~4 号压力钢管结构尺寸与布置相同,钢管结构计算时选择地质条件相对较差的洞段进行计算,同一计算管段选取内压或内径较大的断面作为计算断面,根据地质资料,1~4 号压力钢管围岩岩性为角闪片岩、绿帘石片岩,围岩以Ⅲ类为主。

(2)荷载种类与取值

①荷载种类

压力钢管荷载种类及其分项系数见表 4。

表 4 压力钢管荷载种类及其分项系数

荷载代号	荷载分类及名称	荷载分项系数
1	正常运行情况最高内压(静水压力+水击压力)	静水:1.0
2	特殊运行情况最高压力(静水压力+水锤压力+脉动压力+计算误差)	水击:1.1
3	灌浆压力	1.3
4	管道放空造成的气压差	1.0
5	地下水压力	1.0

表 5 工况与荷载组合情况表

计算工况	设计状况	荷载效应组合		备注
		组合类别	组合项次	
工况 1	持久		1b	正常运行情况
工况 2	短暂	基本组合	12+13a	检修放空情况
工况 3			10	施工情况
工况 4	偶然	偶然组合	1c	特殊运行情况

②荷载取值

a. 内水压力:压力钢管设计内水压力按过渡过程计算结果分析确定,为 1.26~1.28 MPa。

b. 灌浆压力:回填灌浆压力取 0.3 MPa。

c. 管道放空造成的气压差:根据规范一般取 0.05~0.1 MPa,该工程通气条件良好,偏安全取 0.1 MPa。

d. 外水压力:该工程压力钢管布置区天然地下水位较低,考虑调压室内水外渗的影响,钢管抗外压稳定计算时地下水位偏安全取调压室最高涌浪水位,并考虑一定的折减,确定外水压力取值为 0.63 MPa。

(3)工况与荷载组合

(下转第 112 页)

效果,虽通风竖井相对较长和运行时段有限,但风道式通风方案优势较为明显,在后续长大引水隧洞施工通风设计中,积极采用风道式通风是经济合理的。

参考文献:

[1] 湛少英.长距离大断面水工隧洞掘进施工通风技术解析[J].四川水利,2021(增2):11-14.

[2] 唐浩,郑宏雷.两河口水电站某隧道通风方案及造价分析[J].黑龙江水利科技,2009,37(2):45-47.

[3] 苟红松,李永生.高海拔地区隧道施工通风风量计算及风机选型研究[J].隧道建设,2012,32(1):53-56.

[4] 张东明,王媛.锦屏水电站引水隧洞群长距离通风问题研究[J].人民黄河,2012,34(6):128-130.

[5] 武艳红.地下洞室群施工排烟竖井辅助通风的设计[J].四川水利发电,2020,39(6):71-75.

作者简介:

陈 阳(1995-),男,重庆梁平人,工程师,学士,从事水利水电工程施工组织设计方面的研究工作;

余志超(1982-),男,湖北孝感人,正高级工程师,硕士,从事水利水电工程施工组织设计方面的研究工作.

(编辑:吴永红)

(上接第 100 页)

压力钢管按承载能力极限状况设计,工况与荷载组合情况见表 5。

(4)计算结果。压力钢管管壁厚度复核计算

表 6 压力钢管管壁厚度复核计算成果表

部位	钢管内径 /m	设计内水压力 /MPa	单位围岩弹性抗力 /(MPa/cm)	设计壁厚取值(含锈蚀厚度) /mm
钢衬起点至厂房 上游侧 20 m	8.5	1.26	50~20 (计入围岩抗力的埋管)	28
厂房上游侧 20 m 范围	8.5	1.28	0 (不计围岩抗力的埋管)	28

表 7 压力钢管抗外压稳定复核计算成果表

计算截面	钢管内径 /m	管壁厚度 /mm	设计外压 /MPa	加劲环环间管壁抗外 压稳定安全系数		加劲环自身抗外压 稳定安全系数	
				计算 安全系数	规范规定的 最小安全系数	计算 安全系数	规范规定的 最小安全系数
钢衬起点至 厂房上游侧 20 m	8.5	28	0.73	4.10	1.8	2.07	1.8
厂房上游侧 20 m 范围	8.5	28	0.73	4.10	2.0	2.07	2.0

4 结 语

根据工程地形地质、枢纽布置条件,提出不同的压力管道布置思路,竖井布置方案除施工难度较大外,水力条件、快速门设计、工程投资等方面均优于缓坡布置方案,因此选择竖井式布置方案。并针对选定的布置进行压力管道结构设计,设计思路可供类似工程参考。

参考文献:

[1] 国家能源局,水电站压力钢管设计规范:NB/T 35056—2015[S].北京:中国电力出版社,2016.

[2] 杨海红,官忠瑞,邓拥军.黄登水电站压力钢管设计[J].水力发电,2019,45(06):26-30,55.

[3] 水电水利规划设计总院.水工设计手册(水电站建筑物)[M].北京:中国水利水电出版社,2013.

[4] 住房和城乡建设部.水工建筑物荷载标准:GB/T 51394-2020[S].北京:中国计划出版社,2020.

[5] 伍鹤皋,周彩荣,付山,等.埋藏式压力钢管加劲环抗外压稳定分析方法探讨[J].水力发电学报,2015,34(12):19-23.

作者简介:

罗佩玉(1991-),女,重庆綦江人,工程师,工学硕士,从事水工设计工作;

刘 朋(1994-),男,山东菏泽人,工程师,工学硕士,从事水工设计工作.

(编辑:吴永红)