

锦屏二级水电站高埋深隧洞地下水处理技术

李 强, 肖 普

(北京振冲工程股份有限公司, 北京 100102)

摘要: 锦屏二级水电站深埋长隧洞群平均埋深达到 1500~2000 m, 地应力高, 工程地质条件复杂, 此地质条件下地下水处理施工较为困难。为解决以上问题, 本工程地下水处理采取分阶段进行, 即先对出水洞段进行勘察, 然后表面封堵小流量及次大流量的出水点、段, 再深层加固围岩, 形成一定厚度的均一防渗固结圈, 最后对集中涌水点进行封堵。处理后各项检查结果均满足合格标准, 达到了预期的处理效果。

关键词: 锦屏二级水电站; 深埋长隧洞; 地下水处理

中图分类号: TV554 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-7428(2020)12-0060-06

Groundwater treatment technology for deep buried tunnels at Jinping II Hydropower Station

LI Qiang, XIAO Pu

(Beijing Vibro Engineering Co., Ltd., Beijing 100102, China)

Abstract: The deep-buried long tunnel group at Jinping II Hydropower Station has an average buried depth of 1500~2000m with high stress and complex engineering geological conditions which lead to difficult groundwater treatment. Groundwater treatment for this project was done in stages. First, survey was performed for the outlet tunnel section; then, the outlet points and sections with small flow and sub-large flow were blocked on the surface, and the deep surrounding rock was reinforced to form a uniform anti-seepage consolidated ring of some thickness; finally, the concentrated water gushing point was sealed off. After treatment, the inspection results all met the standard and achieved the expected treatment effect.

Key words: Jinping II Hydropower Station; deep buried long tunnel; groundwater treatment

0 引言

长隧洞施工最为突出且最为普遍、危害最广的就是地下水问题^[1-2]。地下水问题影响隧洞施工的安全, 同时增加了隧洞施工的难度, 对施工进度造成了严重影响, 其能否合理妥善地处理直接影响着整个工程的进行与发展^[3-5]。

锦屏二级水电站引水隧洞穿越锦屏山脉, 单工作面施工长度达 10 km 以上, 开挖洞径 12.4~13 m, 最大埋深约 2525 m, 埋深超过 1500 m 的洞段占 76.7%^[6]。引水隧洞内地质条件复杂, 岩溶裂隙水丰富, 水压力大, 最大水压力达 10 MPa^[7]。大量工程实践表明, 深埋长隧洞工程由于地应力高、穿越的不同地质单元多, 地下水处理不当, 就会影响工程进

度和人员安全^[8-9]。

3 号引水隧洞沿线地层岩性主要为三叠系中、上统的大理岩、灰岩及砂岩、板岩, 从东到西分别经过盐塘组(T_{2y})、白山组(T_{2b})、三叠系上统(T_3)、杂谷脑组(T_{2z})、三叠系下统(T_1)等地层^[10]。洞段岩溶裂隙发育, 断层构造带较多, 涌水主要为富水洞段典型的溶洞或岩溶管道发育区的集中涌水。此类富水存在于岩溶非常发育区, 且发育区垂直厚度很大, 与稳定补给水源连通性非常好, 且补给源与出水点相对高差大。隧洞开挖破坏其渗流平衡, 揭露出管道式出水点, 使地下水得以突然释放, 形成大流量、高压涌水。涌水出水量最大约 1.2~1.6 m³/s, 出水量大、压力高。

收稿日期: 2020-05-26; 修回日期: 2020-08-31 DOI: 10.12143/j.tkgc.2020.12.010

作者简介: 李强, 男, 汉族, 1978 年生, 高级工程师, 水利水电建筑工程专业, 从事水利水电工程施工工作, 北京市朝阳区望京西园 221 号博泰大厦 12F, 39519429@qq.com。

引用格式: 李强, 肖普. 锦屏二级水电站高埋深隧洞地下水处理技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(12): 60—65.

LI Qiang, XIAO Pu. Groundwater treatment technology for deep buried tunnels at Jinping II Hydropower Station[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(12): 60—65.

对于深埋隧洞大流量地下水的处理,虽然国内外别的工程有过许多成功处理的经验和方法^[11],但此类水的处理较为复杂^[12],各个工程的地下水情况均有其特殊性,需根据实际情况采用综合手段及多种工艺进行处理。本文通过对本工程东端 3 号引水隧洞大流量地下水处理施工经验进行总结,以期为类似工程提供借鉴。

1 地下水处理

(1)大流量地下水的处理是个综合、系统的工程,切忌就出水点处理出水。其一:由于出水点处水量大、压力高,直接处理难度大;其二:直接处理出水点,将使内水压力升高,其它相对薄弱面容易被击穿,地下水可能从原涌水点向上下游洞段渗透,从而可能导致其它部位压力和水量的增大或新增出水段(点),且出水点周边一定范围内也可能会出现抬动破坏。

(2)为提高处理速度和效果,防止无限增大成本,必须结合考虑邻近的洞段,兼顾到其它部位进行系统处理。

根据这一要求,本工程处理大流量地下水分为现场勘察、表面封堵、深层加固、封堵 4 个阶段进行,主要流程为“先对出水洞段进行勘察;然后进行表面封堵小流量的出水点、段并形成盖重层;再深层加固围岩形成一定厚度均一防渗固结圈;最后对集中涌水点进行封堵”。

1.1 现场勘探

在进行大流量地下水处理之前,为准确掌握和了解出水洞段的岩溶水文地质情况,先对该洞段进行物探(单孔声波及孔间 CT 探测等)探测,探明岩溶发育情况及富水构造^[13],之后,根据探测结果,对岩溶发育区域及集中涌水部位周围进行钻孔勘探,以寻找各主要透水带的位置及规模,为后续封堵灌浆提供依据,指导封堵灌浆具体实施。现场勘探见图 1、图 2。

1.2 表面封堵

现场勘探完成后,先对出水点及周围可能受影响洞段进行表层封堵施工。其目的是通过对该段一般渗滴水和股状水的表层封堵,形成了不小于 6.0 m 厚度的浅层阻水承压带,同时为深层地下水处理提供了一定的盖重条件。

1.2.1 施工参数



图 1 声波、CT 探测

Fig.1 Acoustic and CT detection



图 2 现场钻孔勘探

Fig.2 On-site drilling exploration

表层封堵灌浆孔环距 2.0 m,每环 20 孔,梅花形布置,孔深 6 m,各孔均一次性钻进至目的孔深后进行纯压式灌浆。灌浆按“环间分序,环内加密”的原则施工。浆液水灰比为 0.8 : 1、0.5 : 1 两个比级,灌浆压力 1.5 MPa(涌水孔为 1.5 MPa+2 倍涌水压力),灌浆孔吸浆量 < 1 L/min,继续灌注 10 min 即可结束灌浆。封孔使用水灰比为 0.5 : 1 的纯水泥浆,封孔压力 1.5 MPa,封孔时间 < 30 min。

1.2.2 工艺流程

表层封堵施工顺序为从两边(上下游)向中间靠拢,即先从距涌水点较远的上下游外围开始施工,再逐渐向涌水点靠近的顺序进行施工。表层封堵单孔施工工艺流程见图 3。

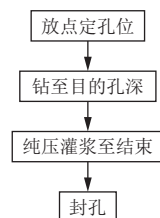


图 3 表层封堵单孔施工工艺流程

Fig.3 Single hole construction process for surface sealing

1.3 深层固结

表层封堵施工完后,即可开始对出水点及周围可能受影响洞段进行深层固结施工,其目的有2点:其一,起截流作用,截断涌水与四周岩层的水流通道,防止在后续集中出水点处理时,原涌水沿四周不同深度的主通道向外分散,从而可能导致其它部位压力和水量增大或新增出水段(点),给封堵施工增加额外的困难;其二,深层加固围岩形成一定厚度均一防渗固结圈,把外水阻挡在防渗圈范围之外,以防止后续集中出水点处理完后,地下水内水压力升高,而导致围岩的薄弱面会被击穿,以及可能会出现的变形和抬动。

1.3.1 施工参数

深层固结灌浆孔环距3.0 m,每环20孔,梅花形布置,孔深20 m,灌浆方式为纯压式,Ⅰ序孔自浅而深分段施工,Ⅱ序孔自深而浅分段施工。灌浆按“环间分序,环内加密”的原则施工。浆液水灰比为 $2:1$ 、 $1:1$ 、 $0.8:1$ 、 $0.5:1$ 四个比级,灌浆压力6.0 MPa,每段吸浆量 <1 L/min,继续灌注30 min,即可结束。封孔使用水灰比为 $0.5:1$ 的纯水泥浆,封孔压力1.5 MPa,封孔时间 <30 min。

1.3.2 工艺流程

深层固结施工顺序为先施工Ⅰ序孔,再施工Ⅱ序孔,灌浆孔同环同序孔按先灌注无水孔,后灌注有水孔的顺序进行施工。深层固结单孔施工工艺流程见图4。

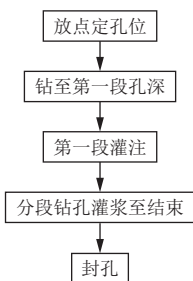


图4 深层固结单孔施工工艺流程

Fig.4 Single hole construction process for deep consolidation

1.4 集中出水点处理

1.4.1 处理顺序

在完成围岩系统加固,确认围岩安全后,再进行集中出水点的封堵施工。本工程集中出水点的处理方式按照“先排后堵,深排浅堵、远排近堵,择机收口”的思路和顺序进行^[14]。

(1)先排后堵。对于大的出水点,不能开始就考虑全部封堵,而应先考虑有序引排,系统布置分流减压孔,分散和释放原集中出水点的流量和压力,再封堵原出水点,逼迫水流由预设的分流减压孔改道排放。

(2)深排浅堵、远排近堵。对于预设的分流减压孔按先封堵浅层排水孔和距离原出水口近的出水孔,让流水再次改道和束流由深层排水孔和距离原出水口远的排水孔进行排放。

(3)择机收口。对最后预留的几个可控排放孔进行最后封堵,最后对相对薄弱环节局部加固,完成施工。

1.4.2 施工工序流程

沉箱制安、盖重混凝土浇筑及孔口管预埋→分流减压孔钻孔→封堵原始出水主通道→原始出水点加固处理→分流减压孔灌浆→择机收口。

1.4.2.1 沉箱制安、盖重混凝土浇筑及孔口管预埋

为改善出水点及周边的钻灌作业环境,增强原始出水点和分流减压孔封堵期间的整体抗抬能力,方便分流减压孔钻孔及孔口管、高压闸阀的安装,在原始出水点上方安装钢制沉箱,在沉箱里预埋孔口管,并在沉箱上浇筑厚0.5~1.7 m的盖重混凝土。

钢制沉箱既为集中出水点处理提供盖重条件,也作为集中出水点处理的施工作业平台,钢制沉箱制安见图5,孔口管预埋及混凝土浇筑后钢制沉箱效果见图6。



图5 沉箱制安

Fig.5 Caisson fabrication and installation

1.4.2.2 分流减压孔施工

(1)分流减压孔布置。分流孔施工的主要目的在于截取集中出水点主通道一定深度部位的部分岩溶水和裂隙水,由埋入带阀门的耐压引水管(钢管)排出,使原出水点水量减小、压力降低。为能截穿涌



图 6 注浆孔口管预埋及砼浇筑后的沉箱效果
Fig.6 Caisson with the pre-embedded grouting pipe and cast concrete

水点主管道,采取从集中出水点附近以一定孔距、倾斜角打孔,布孔形式主要围绕集中出水点及可能出现的出水主通道部位进行布置。

(2)分流减压孔钻孔。分流孔采取大口径开孔,考虑打出高压水不利于扩孔和孔口管埋设,一般采用 $\Phi 130 \sim 189$ mm 孔径开孔,预埋 $\Phi 110 \sim 148$ mm 孔口管,孔深不定,以打出大水为宜,垂直深度 ≥ 20 m。如孔深打到 20 m 后,对未打出水或少量出水的孔,则及时灌注封堵。现场分流减压孔钻孔见图 7。



图 7 现场分流减压孔钻孔
Fig.7 Drilling of diversion holes for pressure relief

1.4.2.3 封堵原始涌水主通道

(1)通过若干分流孔分流、降压,原始涌水点出水量基本减少,压力明显降低后,达到灌浆封堵的条件。原始涌水点封堵时,先采用地质钻机通过沉箱预埋管钻孔,使用自浅而深分段的方式进行灌注,由于此类孔紧邻原始涌水点,出水量较大,一般都需使用特种堵水灌浆材料进行灌注,待地下水封堵后再扫孔使用纯水泥浆复灌至结束标准。如此类推,直至把地下水封堵至防渗固结灌浆圈之外。

(2)堵水灌浆参数。

①灌浆压力确定:出水孔为出水压力的 2 倍但

不低于 1.5 MPa,现场根据灌浆实际情况进行相应调整。

②灌浆根据情况选用纯水泥浆、水泥-水玻璃双液浆、特种堵水浆液。

③浆液比级:水泥浆的比级采用两级 0.8 : 1、0.5 : 1,特种浆液使用 0.5 : 1 比级添加堵水专用材料。特种浆液选用配比为水 : 水泥 : 天然砂 : 特 A : 特 B : 特 C = 0.5 : 1 : 1 : 0.005 : 0.025 : 0.025。

④变浆原则:一般情况不出水和出水较小的孔段灌浆,变浆原则采用《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》(DL/T 5148—2001)所述原则进行变浆,变浆达到 0.5 : 1 浆液,灌注未出现异常情况的孔段不作限流。若灌注出现异常情况的孔段,首先采用 0.5 : 1 的浓浆灌注,视情况采用水泥-水玻璃双液浆或特种堵水材料进行灌注;针对出水较大的孔段,首先采用 0.5 : 1 的浓浆灌注,视情况再采用特种浆液材料灌注。

⑤结束标准:水泥基浆灌注结束标准为在最大注入压力下,吸浆量 ≥ 1.0 L/min,继续灌注 10 min 即可结束;水泥-水玻璃双液浆和特种材料灌浆结束标准为在最大注入压力下,注入量 < 1 L/min,即可结束,避免管路堵塞。

⑥封孔:每孔灌浆结束后,采用全孔灌浆封孔法进行浓浆封孔^[15]。

1.4.2.4 封堵分流孔

(1)原始主通道处理结束后,进行分流孔灌浆封堵,通过分流孔灌浆进一步减少主通道和次通道的涌水来源,以减小最后预留可控排放孔的总出水流量和出水压力,从而降低最后封堵可控排放孔的灌注难度。

(2)分流孔灌浆封堵采取“截断连通、先易后难、各个击破”的处理方式。灌浆封堵先灌注出水水位浅的孔,后灌注出水位深的孔,由近孔(离出水点近的孔)开始灌浆,向远孔(离出水点远的孔)推进。通过由浅而深的灌注,逐步将浆液由浅部向深部堆积填充,达到在一定深度范围内充填封堵岩溶管道水的目的。

(3)灌浆过程中所有分流孔主要排水管阀门打开,观察串浆孔的情况,再进行选择性的关闭或选择性的打开,切忌快速关闭沉箱主要排水系统阀门,否则将会出现盖重混凝土及沉箱抬动与击穿的现象,

造成不可想象的安全隐患,具体应根据灌浆压力的升降情况,逐步缓慢开放和关闭排水管阀门的方式进行分流孔灌注。

1.4.2.5 封堵预留可控排放孔

对最后预留的几个可控排放孔进行最后封堵。引排孔封堵灌浆前,须进行闭水试验,即关闭所有排水孔闸阀,通过抬动孔观察抬动变形及周围岩渗水情况。一般闭水试验时间 ≤ 24 h,如抬动值在设计允许范围,周边岩体渗水无明显增大,且未增加新的出水点,则可直接进行封堵;如抬动值异常或周边出水量增大,抑或是发现了新的出水点,则须立即打开阀门进行泄压,同时对薄弱点做进一步加固处理,完成后再次进行闭水试验,直至满足要求。可控排放孔灌浆使用特种堵水灌浆材料进行连续灌注,为防止堵管,吸浆量 < 1 L/min即可结束灌浆,之后再扫孔改用0.5:1纯水泥复灌至结束标准。

2 灌后质量检查及评价

2.1 渗水检查

本工程堵水灌浆结束后,对原出水洞段进行残余渗漏水流量进行测量,每30 m渗漏水洞段残余渗漏水总量 ≥ 3 L/s,单点集中出水点 ≥ 0.5 L/s,其灌浆质量全部满足合同文件关于堵水灌浆的合格规定。

2.2 压水试验

灌后在主出水孔附近布置检查孔,检查孔压水试验压力为2.0 MPa,在压水试验压力下,85%以上试段透水率 ≥ 3.0 Lu,其他不超过4.5 Lu,且分布不集中为合格。堵水压水试验检查成果见表1。

表1 堵水灌浆压水试验检查结果统计
Table 1 Summary of hydraulic testing results
for water plugging grout

总段数	< 1 Lu 段数/频率	1~3 Lu 段数/频率	> 3 Lu 段数/频率	最大透水率/Lu
588	239/40.6%	349/59.4%	0/0	2.90

根据表1可以看出,堵水灌浆灌后压水检查最大透水率2.90 Lu,所有试段的压水透水率均小于3 Lu;堵水灌浆压水试验质量检查均满足设计质量要求。

2.3 灌后声波检测

岩体灌后声波检查合格标准为:85%的测试值

不小于4500 m/s,小于4250 m/s的测试值不大于3%,且分布不集中为合格。本工程堵水灌浆灌后声波共测试85个孔,测试值均大于4250 m/s,4250~5000 m/s的测试值为12%,大于5000 m/s的测试值为88%,满足设计质量合格要求。

2.4 效果评价

堵水灌浆处理完成后,综合使用渗水检查、压水试验及单孔声波测试等方法对灌浆质量进行了全面检查,各项检查结果均满足合同文件及设计要求的合格标准,达到了预期的封堵灌浆效果。

3 经验与体会

3.1 详细编制施工措施和计划

对于强富水区的大涌水处理,须制定详细周密的施工计划,针对性地制定专门的处理措施,并有效组织实施。对大涌水点的处理不仅要认识到浆材和工艺的重要性,更应该认识到系统方法的重要性,现场主要施工人员更要有丰富的施工经验和应对突发情况的能力。

3.2 综合分析区域水文地质情况

对大涌水点处理不可盲目地就出水点进行表象处理,处理前须结合物探、钻探、地质分析做大量的勘探和水文地质分析,摸清涌水区域内的水文地质构造,水系连通情况,为针对性制订处理方案提供依据。

3.3 科学布置堵排体系

在地下水处理的过程中,必须综合、系统地考虑整个堵排体系,全面了解堵水灌浆孔、加固灌浆孔、分流减压孔、引排孔等之间的相互影响关系,针对各类灌浆孔的处理顺序、阶段性作用必要时有机、有序地结合施工。

3.4 综合应用各种施工工艺

对于大涌水处理需综合运用各种工艺技术、多种浆材(如在高压大流量富水地层,宜使用防冲刷能力强、密度大的特种水泥砂浆、膏状浆液等特种浆材),配置适合的机械设备及专用工器具。

3.5 加强抬动监测

地下水发育和破碎围岩洞段在灌浆过程中必须加强围岩的抬动观测,灌注过程中稳定升压,抬动发生时及时降压,避免高压灌浆对浅层破碎围岩、盖重混凝土和沉箱等的破坏。

4 结语

(1)高埋深隧洞施工中大流量地下水的处理是个综合、系统的工程,切忌就出水点处理出水点。必须结合考虑邻近的洞段,兼顾到其它部位进行系统处理。尤其要先对出水点及其影响的围岩进行系统加固,确认围岩安全后,才能进行集中出水点的封堵施工,否则可能造成其它相对薄弱面被击穿,导致其它部位压力和水量的增大或新增出水段(点),且可能会出现抬动破坏。

(2)对于大的出水点,不能一开始就考虑全部封堵,而应先考虑有序引排,系统布置分流减压孔,分散和释放原集中涌水点的流量和压力,再封堵原出水点,最后再一步一步地封堵分流孔和排放孔。

(3)在本工程地下水处理过程中,上述方法取得了良好的效果,引水隧洞的出水点得到了有效的治理,各项检查结果均满足合同文件及设计要求的合格标准。水电站充水发电后,各项安全监测指标正常,引水隧洞内外水无水力联系,实现了设计预期的施工目标。

参考文献(References):

- [1] 肖璇.金寨顶隧洞地下水应对措施及处理技术[J].四川水利, 2017,38(4):32-34.
XIAO Xuan. Countermeasures and treatment technology of groundwater in Jinzhaiding tunnel[J]. Sichuan Water Conservancy, 2017,38(4):32-34.
- [2] 王浩宇.长输水隧洞中地下水影响评价分析及措施[J].陕西水利,2020(1):117-119.
WANG Haoyu. Groundwater impact assessment analysis in the long water conveyance tunnel and its measures[J]. Shaanxi Water Resources, 2020(1):117-119.
- [3] 杨学定,吕锋.喀斯特地区深埋隧洞的地下岩溶及地下水处理浅析[J].黑龙江水利科技,2020,48(4):134-135,157.
YANG Xueding, LÜ Feng. Preliminary analysis of underground karst and groundwater treatment of deep tunnel in karst area[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2020,48(4):134-135,157.
- [4] 郑宏博.地下隧洞开挖施工中突涌水处理技术[J].水能经济, 2017,73(1):56-57.
ZHENG Hongbo. Treatment technology of water inrush and gush in underground tunnel excavation[J]. Hydropower Economy, 2017,73(1):56-57.
- [5] 杜雷攻.长大深埋水工隧洞设计关键技术研究与实践[J].水利水电技术,2017,48(10):1-9.
DU Leigong. Study and practice on key design techniques for long deeply buried hydraulic tunnel[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017,48(10):1-9.
- [6] 周垂一,周永,李军.锦屏二级水电站引水隧洞施工总体设计[J].水力发电,2010,36(1):14-16,56.
ZHOU Chuiyi, ZHOU Yong, LI Jun. Tunnel Construction Design for Jinping II Hydropower Station[J]. Water Power, 2010,36(1):14-16,56.
- [7] 龙铭谦.锦屏二级水电站引水隧洞岩溶段裸岩灌浆堵水施工技术[J].西部交通科技,2017,125(12):47-51.
LONG Mingqian. Grouting water-blocking construction technology for bare rock in karst section of Jinping Secondary Hydropower Station diversion tunnel[J]. Western China Communication Science & Technology, 2017,125(12):47-51.
- [8] 葛金花,任旭华,张海波,等.深埋隧洞透水衬砌渗控研究[J].水力发电,2014,40(7):39-41.
GE Jinhua, REN Xuhua, ZHANG Haibo, et al. Research on seepage control of deep-buried tunnel permeable lining[J]. Water Power, 2014,40(7):39-41.
- [9] 周垂一,李军,严鹏.锦屏二级水电站深埋隧洞施工难点解析[J].隧道建设,2013,33(6):481-488.
ZHOU Chuiyi, LI Jun, YAN Peng. Analysis on difficulties in construction of deep-covered tunnels: case study on tunnels of Jinping II Hydropower Station [J]. Tunnel Construction, 2013,33(6):481-488.
- [10] 王继敏,曾雄辉,揭秉辉.锦屏二级水电站引水系统关键技术问题[J].水力发电,2013,39(4):47-50.
WANG Jimin, ZENG Xionghui, JIE Binghui. Study on key technical problems for constructing Jinping II Hydropower Station[J]. Water Power, 2013,39(4):47-50.
- [11] 徐国鑫,姚俊.长大隧洞工程建设中地下水处理的实践及思考[J].水利水电技术,2017,48(8):101-106.
XU Guoxin, YAO Jun. Practice and thinking on groundwater treatment in construction of long large-sized tunnel[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017,48(8):101-106.
- [12] 黄一玲,孙建东,沈宗果,等.复杂地质条件下洞室开挖施工技术[J].云南水力发电,2019,35(S2):163-166.
HUANG Yiling, SUN Jiandong, SHEN Zongguo, et al. Construction technology of underground cavern excavation under complex geological conditions[J]. Yunnan Water Power, 2019,35(S2):163-166.
- [13] 毛进.引水隧洞过涌水突泥段施工技术方案[J].建筑技术开发,2017,44(14):84-85.
MAO Jin. Construction technology scheme of diversion tunnel in overflow[J]. Building Technique Development, 2017,44(14):84-85.
- [14] 张春生,周垂一,刘宁.锦屏二级水电站深埋特大引水隧洞关键技术[J].隧道建设,2017,37(11):1492-1501.
ZHANG Chunsheng, ZHOU Chuiyi, LIU Ning. Key technology for extremely-large deep-buried headrace tunnel: a case study of Jinping II Hydropower Station [J]. Tunnel Construction, 2017,37(11):1492-1501.
- [15] 张文涛,陈敏,钟久安.锦屏二级水电站引水隧洞末端岩溶处理的实践研究[J].中国勘察设计,2019(4):101-103.
ZHANG Wentao, CHEN Min, ZHONG Juan. Practical study on karst treatment at the end of diversion tunnel of Jinping II Hydropower Station[J]. China Engineering & Consulting, 2019(4):101-103.

(编辑 王建华)