

阳江抽水蓄能电站高压固结灌浆现场 试验设计及参数优化

黄 勇¹, 宋春华¹, 路 威², 赵卫全²

(1. 广东省水利电力勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510635;

2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘 要: 以阳江抽水蓄能电站水道高压固结灌浆为研究对象, 系统设计了现场固结灌浆试验, 研究了 10 MPa 超高压灌浆的可行性, 并对灌浆参数进行了优化。试验结果表明: 受岩体不均匀性影响, 相同类别围岩的不同试验单元, 高压水泥灌浆时的灌浆量差异显著, 化学灌浆封堵水泥颗粒无法进入的微细裂隙是采取的的必要措施; 采用较高压力时的灌浆效果更优, 灌浆孔入岩大于 2 m 段采用 8 MPa~10 MPa 压力水泥灌浆、再采用 8 MPa 压力原孔扫孔化学灌浆补强可行; II、III 类围岩分别采用 2.5 m 和 2.0 m 排距合适; 采用湿磨细水泥浆液与普通水泥灌浆相比, 灌浆效果差别不明显。

关键词: 阳江抽水蓄能电站; 高压固结灌浆; 试验方案设计; 参数优化

中图分类号: TV522

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2023)02—0008—05

Field Test Design and Parameter Optimization of High Pressure Consolidation Grouting of Yangjiang Pumped-Storage Station

HUANG Yong¹, SONG Chunhua¹, LU Wei², ZHAO Weiquan²

(1. Guangdong Hydropower Planning & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510635, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on 10 MPa consolidation grouting in high pressure tunnel of Yangjiang pumped-storage station, field test was done after systematic grouting test design to evaluate the feasibility and choose suitable parameters. The results are as follows. Because of the heterogeneity of rock mass, unit grouting amount of cement in test sections with same types of surrounding rock were significantly different and chemical grouting was necessary. Higher pressure could get better grouting effect, 8 MPa~10 MPa pressure cement grouting for holes deeper than 2 m into surrounding rock and 8 MPa pressure chemical grouting was feasible. Row spacing with 2.5 m and 2.0 m was better for rock class II and III. Using OPC as grouting material was better than wet ground cement.

Keywords: Yangjiang pumped-storage station; high pressure consolidation grouting; grouting test design; parameter optimization

钢筋混凝土限裂衬砌结构作为高水头抽水蓄能电站高压隧洞的主要衬砌形式, 在工程建设中得到了广泛应用。该结构中围岩是承载高水压的主体, 衬砌仅起到减糙、保护围岩和提高隧洞耐久性的作用, 能够充分发挥围岩承载能力, 投资少、工期短, 但

是对围岩的强度、均匀性和渗透性要求较高^[1-4]。固结灌浆作为处理不良地质条件和岩体损伤的有效手段而普遍用于限裂衬砌的高压隧洞围岩加固, 以抵抗内水压力、减少外渗和防止岩体渗透失稳, 其质量的好坏将直接关系着工程的成败^[5-6]。通常不同

类别围岩的灌浆压力、材料和工艺以及灌浆孔布置等关键设计参数,多采用工程类比和现场试验等手段确定^[7-12]。

阳江抽水蓄能电站(以下简称阳蓄电站)高压隧洞的最大静水头 799 m,比天荒坪电站(680 m)高约 17.5%,为国内已建同类电站中最高,在国际上也位居前列^[1,4,13-14]。按照《水工隧洞设计规范》^[15],围岩固结灌浆压力一般为 1 倍~2 倍的内水压力,高压钢筋混凝土衬砌隧洞固结灌浆压力为该处静水头的 1.2 倍~1.5 倍,且宜通过试验合理确定灌浆参数。阳蓄高压隧洞固结灌浆压力取静水头的 1.2 倍时已达到 10 MPa,远超国内同类工程,已有施工和试验成果的参考性有限。

以此为研究对象,本文根据阳蓄电站高压隧洞地质条件选择典型试验洞段和关键灌浆参数,系统设计了现场试验,分析了不同类别围岩的灌浆规律,探讨了 10 MPa 级压力灌浆的可行性,在分析压力、孔排距、材料和断层带灌浆顺序等关键参数对灌浆效果影响的基础上,提出了适用于本工程的优化灌浆参数。现场试验成果成功用于高压隧洞固结灌浆施工,水道于 2021 年 11 月一次充水成功,为电站顺利投产奠定了可靠基础。

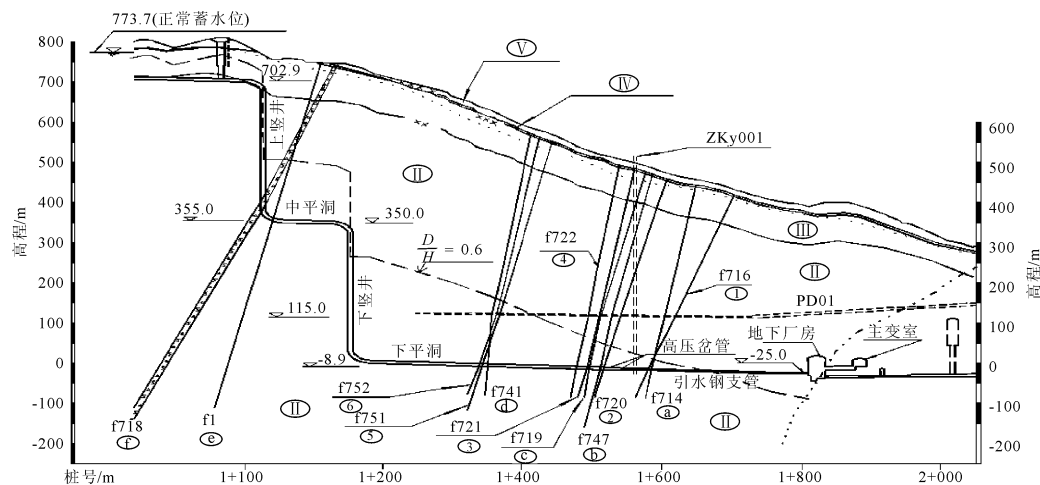


图1 阳蓄电站输水发电系统纵剖图

2 现场试验方案设计

2.1 试验目的

阳蓄电站高压隧洞采用钢筋混凝土透水限裂衬砌结构,利用围岩承担内水压力的设计前提是围岩不发生水力劈裂。前期的一系列勘探试验成果表明,阳蓄电站隧洞围岩具备一定的抗水力劈裂能力。但由于水道承受的水头超高,灌浆设计和施工均超

1 工程概况

阳蓄电站位于广东省阳春市与电白县交界处的八甲山区,规划装机容量 2 400 MW,分两期建设,近期装机容量 1 200 MW。电站输水发电系统总体上呈近 SN 向布置,其中竖井至地下厂房段为高压隧洞。如图 1 所示,立面上布置 2 级竖井和 3 段平洞,采用钢筋混凝土透水限裂衬砌,最大内径 7.5 m,其下平洞最大静水头 799 m,最大 PD 值 5 993 m²。

工程区属于低山—丘陵地貌,地势总体呈北低南高。高压隧洞通过的岩性均为燕山三期中粗粒花岗岩,除局部围岩受断层影响呈强—弱风化,其余大部分洞段深埋于微风化—新鲜岩体内,断层破碎带以Ⅲ类围岩为主,夹少量Ⅳ类围岩。高压隧洞下平洞总长度约 700 m,洞段发育断层 10 条,规模均较小,宽度 0.1 m~1.1 m,与洞轴线夹角一般大于 60°,断层的透水性均较好,地下水呈流线状出露^[9]。围岩以Ⅰ类、Ⅱ类为主,岩体具有块状或整体状结构,在断层和裂隙密集带有Ⅲ类、Ⅳ类围岩,高岔及下平洞围岩的最小水平主应力 9.75 MPa~10.9 MPa。

出现有工程经验范围,需要通过现场高压灌浆试验,探索高压固结灌浆的可行性,验证和优化调整固结灌浆设计参数,评估灌浆对不同类别围岩的灌浆效果;寻求合理可行的施工方法、施工工艺和控制措施,指导工程施工。

2.2 试验洞选择

阳蓄电站 10 MPa 级固结灌浆现场试验是探索性的试验,若直接在高压隧洞内开展,虽然得到的试

验数据指导性更强,但是一旦出现灌浆效果不达预期,围岩抬动、劈裂或衬砌结构破坏等问题,会对试验段的围岩完整性产生不可逆转的破坏,甚至影响工程安全。为避免出现上述情况,合理的选择是寻找与高压隧洞工程地质条件类似的其他洞段开展试验。

为使现场试验成果更符合工程实际,选择的试验洞段应具备的条件为:①走向和岩性与下平洞基本一致;②包含Ⅱ类—Ⅳ类围岩,且有代表性断层通过;③有足够的埋深,交通方便,便于试验开展。经过比选,工程勘察时开挖的地质探洞 PD01 桩号 0 + 890 m—1 + 026 m 段具备上述条件,其岩性为粗粒花岗岩,有 f751、f752 和 f718 三条断层经过,围岩分类情况为Ⅳ类围岩长度 10.5 m (含断层段),Ⅲ类围岩长度 41 m,Ⅱ类围岩长度 84.5 m。因此选择此段为试验段,并按照高压隧洞断面设计尺寸扩挖和衬砌,进行高压固结灌浆现场试验。

2.3 试验方案

与一般的灌浆试验不同,由于围岩的不均匀性,单独某个点或断面的灌浆试验结果具有一定的随机性;同时高压固结灌浆需要针对围岩类别综合考虑压力、孔排距、材料、水泥灌浆后化学灌浆的钻孔方式、灌浆加固顺序等多个参数,受试验场地、时间和投资限制,不可能对每类围岩均进行单变量参数敏感性分析。因此,现场试验前需要统筹考虑,首先根据试验洞段的围岩类别,划分试验单元,每个试验单元的灌浆参数相同,以保证每组参数试验有较多数据,降低随机性的影响;然后结合工程经验,明确不同类型围岩的灌浆基准参数,并选择对灌浆效果、工程投资影响大的参数作为比较参数重点试验验证。

按照上述原则,将试验洞段划分为 14 个试验单元,每个试验单元包含 3 ~ 5 个灌浆环,每环 12 个孔。现场试验洞段的地质条件、单元划分和试验内容如图 2 所示,不同类型围岩的基准参数和比较参数如表 1 所示。

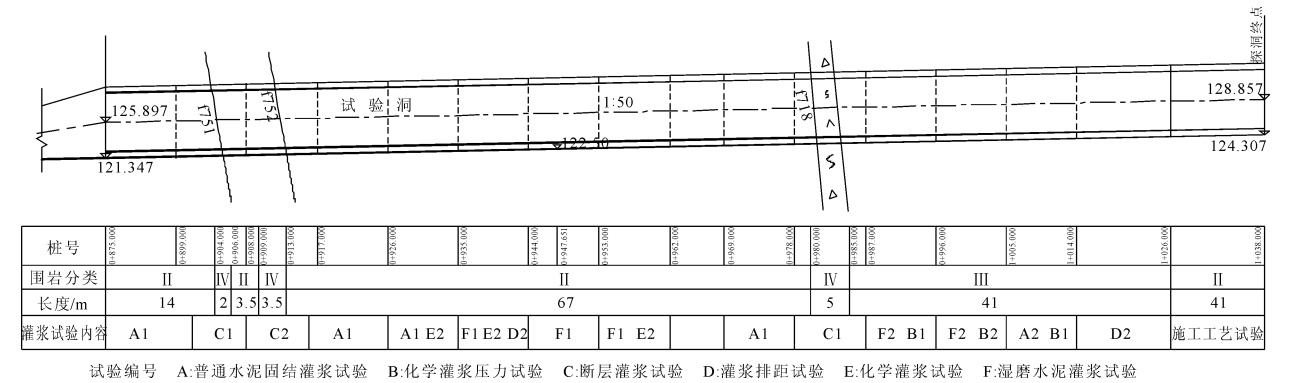


图 2 现场试验洞段地质条件及灌浆试验设计方案

表 1 不同类型围岩固结灌浆现场试验参数表

围岩类别		水泥灌浆					化学灌浆			
		排距/m	孔深/m	压力/MPa		材料	排距/m	孔深/m	压力/MPa	钻孔方式
				第一段	第二段					
Ⅱ	基准	2.5	6	4.5	10	普通水泥	2.5	5	8	原孔扫孔
	比较	3.0	8、10	3.0、6.0	8	磨细水泥	3.0	—	6	重新开孔
Ⅲ	基准	2.0	6	4.5	10	普通水泥	2.0	5	8	原孔扫孔
	比较	3.0	—	—	—	磨细水泥	3.0	—	6	重新开孔
Ⅱ/Ⅳ	基准	2.0	6	—	10	普通水泥	2.0	5	8	原孔扫孔
	比较	3.0	—	—	—	—	3.0	—	—	—
断层	工序比较	1.5	12	4.5	10	普通水泥	—	10	8	原孔扫孔

3 试验洞灌浆效果分析

3.1 总体灌浆情况

图 3 为不同类别围岩内的试验单元的平均单位

灌浆量分布情况。可见,水泥灌浆和化学灌浆时,平均单位灌入量整体上表现为Ⅱ类围岩 < Ⅲ类围岩 < 断层带,Ⅱ/Ⅳ类围岩与Ⅲ类围岩接近。受岩体裂隙发育不均,高压水泥灌浆时,相同类别围岩的不同试

验单元,平均单位灌浆量差异较大;水泥灌浆后,化学灌浆仍有可灌性,但是除断层略高外,其他类围岩的绝大部分灌浆孔单位灌浆量在 5 kg/m 以下。由此推断,高压条件下,先进行的水泥灌浆可能受围岩类别和灌浆参数的影响较多,在水泥灌浆封堵岩体内较大开度裂隙后,化学灌浆则主要受围岩类别影响,围岩质量越差,平均单位灌浆量越大,围岩中的较大开度裂隙和水泥颗粒无法进入的微细裂隙越多,越需要在水泥灌浆后采用化学灌浆补强。

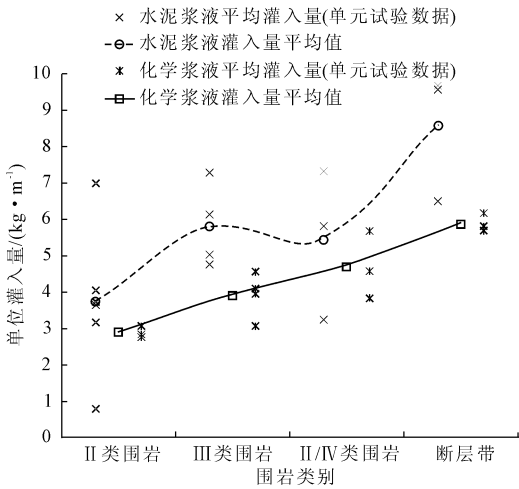


图3 试验单元平均单位注入量

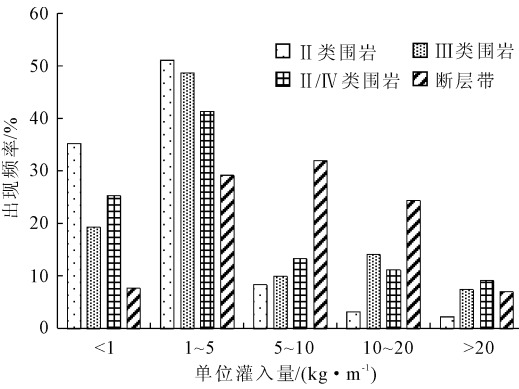


图4 水泥灌浆孔单位灌入量分布

图4为水泥灌浆时各类围岩的灌浆孔单位灌浆量的分布情况。可见,虽然采用了不同的压力、孔排距、灌浆材料和灌浆顺序,但是整体上围岩的质量越好,灌浆孔的单位灌浆量分布越集中,如II类围岩灌浆孔单位灌入量小于 5 kg/m 的出现频率在 85% 以上,零星出现单位灌入量大于 10 kg/m;而断层带灌浆孔的单位灌入量则分布离散,且以 5 kg/m ~ 20 kg/m 为主。

3.2 10 MPa 级压力灌浆的可行性分析

水泥灌浆采用由浅入深分段钻进和灌浆,第一

段入岩深度 2 m,最大压力 4.5 MPa~6.0 MPa;第二段入岩深度 6 m,最大压力 10.0 MPa。

表2和表3分别为灌浆前采用 1.0 MPa~10.0 MPa 压力压水和 4.5 MPa~10.0 MPa 压力灌浆时试验孔的串漏和混凝土衬砌抬动情况。可见,采用 4.0 MPa 以上的压力压水时,试验孔的串漏频率达到 30%~50%,混凝土衬砌最大弹性变形 126 μm;采用 4.5 MPa 压力水泥灌浆时,各类围岩均出现了 5%~10% 的串漏现象。因此,采用分段灌浆是必要和合适的,第一段合理的压水和灌浆压力分别为不超过 4.0 MPa 和 4.5 MPa。

表2 不同压力压水试验成果统计表(Ⅱ类围岩)

入岩深度 /m	试验压力 /MPa	试验孔数 /个	串漏孔数 /个	出现频率 /%	串漏压力 /MPa	混凝土衬砌抬动情况
0~2	<3.0	10	0	0.0	—	—
	4.0	11	5	45.5	2.4~3.2	最大 40 μm,卸压后归零
	4.5	24	7	29.2	4.1~4.5	最大 126 μm,卸压后归零
	6.0	8	4	50.0	4.0~5.1	最大 12 μm,卸压后归零
2~6	7.0	3	0	0.0	—	
	8.0	5	2	40.0	6.0~7.3	无抬动
	10.0	26	9	34.6	4.5~9.2	

表3 灌浆串漏试验孔统计

围岩类别	4.5 MPa 水泥灌浆 (灌浆段入岩 0 m~2 m)		10 MPa 水泥灌浆 (灌浆段入岩 2 m~6 m)		8 MPa 化学灌浆 (灌浆段入岩 0 m~5 m)
	串漏孔数/个	出现频率/%	串漏孔数/个	出现频率/%	
Ⅱ	31	9.9	8	2.4	无串漏现象
Ⅲ	30	14.5	0	0.0	
Ⅱ/Ⅳ	17	8.6	4	1.9	
断层带	3	4.2	4	5.5	

各类围岩的灌浆孔入岩 2 m~6 m 段,均具备 10 MPa 压力灌浆条件,但压水试验压力不应超过 8 MPa,表现为采用 8 MPa 以上的压力压水时,串漏试验孔的出现频率达到 35%~40%,而采用 10 MPa 压力水泥灌浆时,衬砌结构均未出现抬动变形,即使是断层带,串漏孔的出现频率也仅为 5.2%。

水泥灌浆后,各类围岩均可采用 8 MPa 压力全孔化学灌浆,且不会出现串漏现象,这也表明先进行的高压水泥灌浆对岩体具有改善作用。

3.3 灌浆压力对灌浆效果的影响

表4为II类围岩采用不同压力灌浆时的灌浆效果统计。整体上,采用较高压力灌浆时,水泥和化学

浆液的平均单位灌入量略高,灌后岩体的透水率略低,岩体变形模量则相差不大。对于灌浆孔入岩 0 m~2 m 段,采用 3 MPa 压力时的平均单位灌浆量略高的主要原因可能是爆破开挖对围岩浅部扰动不均匀。因此,综合比较,采用较高的水泥和化学灌浆压力时的灌浆效果略优。

表 4 不同灌浆压力的灌后效果统计(Ⅱ类围岩)					
灌浆材料	灌浆段入岩深度/m	灌浆压力/MPa	灌浆量/(kg·m ⁻¹)	灌后岩体变形模量/GPa	灌后透水率/Lu
普通水泥	0~2	3.0	10.34	40.19	0.68
		4.5	7.78	53.72	0.63
	2~6	8.0	3.67	47.9	0.58
		10.0	3.82	46.1	0.58
环氧树脂	0~5	6.0	4.13	24.5	0.71
		8.0	4.57	26.6	0.54

对Ⅱ类、Ⅲ类围岩第 2 段采用 10 MPa 压力水泥灌浆前后,岩体波速、变形模量、透水率、水力劈裂值等进行了钻孔检测。结果表明:灌浆后岩体透水率有所减小,岩体波速、变形模量等与灌前相比基本相当,但也出现了岩体波速、变形模量、水力劈裂压力有所降低的检测点,分析认为过高的灌浆压力可能会对岩体造成损伤。考虑高岔、下平洞围岩条件和最小地应力值等,第 2 段水泥灌浆压力合理范围宜按 8.0 MPa~9.5 MPa 考虑,综合各方面因素,工程施工时选择最大灌浆压力为 8.0 MPa。

对于断层带洞段,根据灌浆后的检测结果,在采取孔深 12 m、压力 10 MPa 的系统水泥灌浆及不同方向穿过断层的加强灌浆措施后,断层带部位岩体波速和变形模量增大,透水率减小,但抗水力劈裂能力尚不能完全满足要求;在进行孔深 10 m、压力 8.0 MPa 的化学灌浆系统补强后,抗水力劈裂能力满足要求。因此,工程施工时第 1、2 段的水泥灌浆压力分别采用 4.5 MPa 和 10.0 MPa,化学灌浆压力采用 8.0 MPa。

3.4 孔排距对灌浆效果的影响

表 5 为Ⅱ、Ⅲ类围岩采用不同灌浆孔排距时的灌后效果统计。可见,整体上Ⅱ、Ⅲ类围岩均表现为采用较近的灌浆孔排距时,水泥和化学浆液的平均单位灌入量更高,灌后岩体的透水率更低。虽然Ⅱ类围岩采用 2.5 m 孔排距灌浆后的岩体变形模量低于 3.0 m 孔排距,但是考虑到变形模量的测值仅反映单点情况,具有离散性和随机性,灌浆量和岩体透水率更能够反映整体情况;同时原孔扫孔化学灌浆

减少了围岩和混凝土衬砌中的钻孔数量。因此,综合比较,Ⅱ类围岩采用 2.5 m 孔排距、Ⅲ类围岩采用 2.0 m 孔排距,在水泥灌浆后原孔扫孔化学灌浆更优。

表 5 不同灌浆孔排距的灌后效果统计					
围岩类别	灌浆孔排距/m	水泥灌浆量/(kg·m ⁻¹)	化学灌浆量/(kg·m ⁻¹)	灌后岩体变形模量/GPa	灌后透水率/Lu
Ⅱ	2.5	2.54	3.08	39.1	0.55
	3.0	2.27	2.85	48.0	0.63
Ⅲ	2.0	7.00	4.57	24.8	0.79
	3.0	2.17	3.08	20.4	0.83

3.5 水泥材料对灌浆效果的影响

表 6 为Ⅱ、Ⅲ类围岩采用不同水泥材料灌浆的灌后效果统计。对比Ⅱ、Ⅲ类围岩采用湿磨细水泥和普通水泥的灌后效果,除岩体变形模量差异较大外,平均单位灌浆量、串漏试验孔的出现频率和灌后岩体的透水率均相差不大,因此,工程应用时以普通水泥作为灌浆材料更为合适。

表 6 不同灌浆材料的灌后效果统计					
围岩类别	灌浆材料	水泥灌浆量/(kg·m ⁻¹)	串孔出现频率/%	灌后岩体变形模量/GPa	灌后透水率/Lu
Ⅱ	普通水泥	3.74	7.5	41.90	0.76
	湿磨细水泥	3.66	10.4	48.61	0.63
Ⅲ	普通水泥	7.30	15.0	17.80	0.47
	湿磨细水泥	6.15	10.4	25.50	0.74

4 结 论

(1) 阳江抽水蓄能电站高压隧洞采用 10 MPa 压力固结灌浆为国内首次,根据围岩类型选择试验洞段和灌浆参数,系统设计现场灌浆试验,研究高压灌浆的可行性并优化灌浆参数是必要的。

(2) 岩体的不均匀性导致相同类别围岩的不同试验单元的水泥灌浆量差异显著,由于岩体中存在水泥颗粒无法进入的微细裂隙,水泥灌浆后仍能灌入化学浆液。为保证对围岩的加固效果,采用系统灌浆、并在水泥灌浆后进行化学灌浆补强是必要的。

(3) 由浅入深分段并根据围岩类别选择灌浆压力和孔排距是合适的。水泥灌浆时,入岩 0 m~2 m 段,压力 4.5 MPa;入岩 2 m 至设计孔深段,压力 8 MPa(Ⅱ、Ⅲ类围岩)、10 MPa(断层带);水泥灌浆后,原孔扫孔化学灌浆补强,压力 8 MPa。Ⅱ、Ⅲ类围岩和断层带的灌浆孔排距分别为 2.5 m、2.0 m 和 1.5 m。

- [2] 张清明,徐 帅,王 锐,等.基于时移 3D 高密度电法的堤坝涵管接触渗漏探测研究[J]. 人民黄河,2021,43(12):135-138.
- [3] 苏怀智,周仁练.土石堤坝渗漏病险探测模式和方法研究进展[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):1-10,39.
- [4] 徐力群,张国琛,马泽锴.土石堤坝隐患探测综合物探技术发展综述[J]. 地球物理学进展,2022,37(4):1769-1779.
- [5] 潘玉玲,Jean Bernard,李振宇,等.轻便新型核磁共振找水仪及其在堤坝监测中的应用[J]. 大坝与安全,2004(1):27-29,48.
- [6] 蒋川东,林 君,秦胜武,等.磁共振方法在堤坝渗漏探测中的实验[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2012,42(3):858-863.
- [7] 王 宏,牛兆伟,张国栋,等.地面核磁共振方法在大坝安全检测中的试验研究[J]. CT 理论与应用研究,2015,24(3):367-376.
- [8] 李宏恩,徐海峰,李 铮,等.地面核磁共振法与高密度电法联合探测堤坝渗漏隐患原位试验研究[J]. 地球物理学进展,2019,34(4):1627-1634.
- [9] 孙怀凤,李术才,李 貅,等.核磁共振测深进行隧道超前地质预报的可行性[J]. 山东大学学报(工学版),2013,43(1):92-97,103.
- [10] 张 楠.核磁共振探测隧道掌子面前方含水方法及应用研究[D]. 济南:山东大学,2016.
- [11] 赵晓岚.隧道核磁共振激发场数值模拟及工程应用研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
- [12] 李振宇.利用地面核磁共振研究滑坡地下水特征及稳定性[D]. 武汉:中国地质大学,2004.
- [13] 马淑芝,贾洪彪,唐辉明,等.利用核磁共振勘测滑坡的水文地质条件[J]. 煤田地质与勘探,2006(6):33-36.
- [14] Weichman P B, Lavelly E M, Ritzwoller M H. Surface nuclear magnetic resonance imaging of large systems[J]. Physical Review Letters, 1999, 82(20):4102-4105.
- [15] Weichman P B, Lavelly E M, Ritzwoller M H. Theory of surface nuclear magnetic resonance with applications to geophysical imaging problems[J]. Physical Review E, 2000, 62(1):1290-1312.
- [16] 林 君,张 健,易晓峰.地下核磁共振小尺寸线圈设计和实验[J]. 地球物理学报,2017,60(11):4184-4193.
- [17] 郑宣耀.基于相似性二次度量的多维数据聚类算法[J]. 计算机应用,2005(S1):176-177.

(上接第 12 页)

(4)水泥灌浆时,采用湿磨细水泥浆液的灌注效果较普通水泥改善不明显,以普通水泥为基材更为经济合理。

参考文献:

- [1] 王玉杰,陈 晨,曹瑞琅,等.高内水压力隧洞钢筋混凝土衬砌裂缝控制标准[J]. 水力发电学报,2020,39(9):111-120.
- [2] 苏 凯,伍鹤皋,周创兵.内水压力下隧洞衬砌与围岩承载特性研究[J]. 岩土力学,2010,31(8):2407-2412.
- [3] 刘 波.水工压力隧洞围岩-衬砌-钢筋耦合作用机理及限裂设计方法研究[D]. 西安:西安理工大学,2014.
- [4] 张秀丽.天荒坪抽水蓄能电站钢筋混凝土岔管结构设计[J]. 水力发电,2001(6):41-43.
- [5] 孙金库,冉懋鸽.不良地质洞段高压固结灌浆处理[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(18):3196-3202.
- [6] 李岩松,陈寿根,周泽林.固结灌浆前、后引水隧洞衬砌力学行为研究[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(2):193-198.
- [7] 杨学祥,李 焰.大岗山水电站高拱坝坝基固结灌浆试验[J]. 水利与建筑工程学报,2010,8(1):35-38,45.
- [8] 杨俊海,王仕虎,张俊龙.惠州抽水蓄能电站高压灌浆施工技术[J]. 水力发电,2010,36(9):43-45.
- [9] 马军峰,李发权.深圳抽水蓄能电站不良地质体化学灌浆防渗加固试验研究[J]. 中国建筑防水,2017(10):30-32,36.
- [10] 李 强,景 峰.钻孔弹模计在高压水工隧洞围岩复合灌浆效果评价中的应用[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):40-44.
- [11] 何 江,陈念辉,潘益斌.锦屏二级水电站引水隧洞围岩固结灌浆设计与实践[J]. 广西水利水电,2021(1):56-60.
- [12] 肖忠礼,龙 方,刘 权,等.深圳抽水蓄能电站引水系统灌浆质量控制与分析[J]. 水力发电,2021,47(2):37-40.
- [13] 杨 磊.阳江抽水蓄能电站高压隧洞段工程地质条件分析[J]. 广东水利水电技术,2017(4):40-44.
- [14] 刘普胜,陈锴锟,李博勇,等.阳江抽水蓄能电站高压隧洞渗流场及渗透稳定性研究[J]. 水利规划与设计,2021(1):105-110,141.
- [15] 水工隧洞设计规范:NB/T 10391—2020[S]. 北京:中国水利水电出版社,2021.