

# 锦屏二级水电站隧洞无盖重高压固结灌浆试验

邹刚

(中国水利水电第七工程局成都水电建设工程有限公司,四川成都611130)

**摘要:**水工隧洞高压固结灌浆的目的是加固隧洞围岩、封闭隧洞周边岩体裂隙,提高隧洞围岩的整体性和抗变形能力,增强围岩抗渗能力和长期渗透稳定性。主要介绍了引水隧洞在未进行混凝土衬砌的条件下实施高压防渗固结灌浆施工的试验及其成果,为该类洞段灌浆设计和施工提供依据。

**关键词:**无盖重高压固结灌浆;隧洞;抗渗;锦屏二级水电站

**中图分类号:**TV554<sup>+</sup>.13 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2011)05-0074-04

**Test of High Pressure Consolidation Grouting without Concrete Covering in Jinping II Hydropower Station/ZOU Gang** (Chengdu Hydropower Construction Engineering Co., Ltd. of Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu Sichuan 611130, China)

**Abstract:** The functions of high-pressure consolidation grouting for hydraulic tunnel are strengthening the tunnel wall rock, sealing rock cranny around the tunnel, increasing the wall rock's integrity and capability of anti-distortion, strengthening the wall rock's impermeability and long-term seepage stability. This article has mainly introduced the tests and the effects of high-pressure consolidation grouting works for diversion tunnel without concrete liner, and provided the basis for grouting design and construction of the tunnel engineering.

**Key words:** high-pressure consolidation grouting without concrete covering; tunnel; seepage control; Jinping II hydropower station

## 1 工程概况

锦屏二级水电站位于四川省凉山彝族自治州境内的雅砻江锦屏大河弯处雅砻江干流上,电站利用雅砻江下游河段150 km长大河弯的天然落差,通过长约16.67 km的引水隧洞,截弯取直,获得水头约310 m;电站总装机容量480万kW。工程枢纽主要由首部低闸、引水系统、尾部地下厂房3大部分组成,共4条引水隧洞,洞线平均长度约16.67 km,一般埋深1500~2000 m,最大埋深约为2525 m。

## 2 试验目的

通过无盖重防渗固结灌浆试验确定合理的灌浆参数和灌浆工艺,为尽快开展已落底洞段无盖重防渗固结灌浆施工提供依据。通过灌浆试验,达到以下几个目的:

(1)了解工程区围岩灌浆特性,检验防渗固结灌浆措施的有效性;

(2)获得合适的灌浆程序、高效的灌浆工艺以及合理的灌浆参数;

(3)及早了解实际施工中可能出现的问题,以确保工期与灌浆质量;

(4)编写引水隧洞围岩防渗固结灌浆试验成果报告,作为该类洞段灌浆设计和施工的主要依据,使设计和施工更符合实际情况,布置更为合理。

## 3 试验段的周围环境和地质条件

本试验段位于2号引水隧洞,桩号K14+530~580,2号洞为钻爆法施工洞段,开挖洞径13 m,马蹄形断面,边顶拱经过系统锚杆支护和喷砼支护,支护类型为S10,边顶拱270°范围布置系统锚杆 $\varnothing 28$  mm, $L=6$  m,边顶拱270°范围挂网喷砼,厚度为20 cm。本段属于Ⅲ类围岩,岩性为 $T_{2Y}^5$ 灰~灰白色厚层状中粗晶大理岩,开挖时揭露地下水比较发育。

## 4 防渗固结灌浆设计参数

### 4.1 试验区布孔形式

根据设计文件及设计图纸要求,从桩号K14+530~560按3 m排距、沿洞轴中心线按22.5°发散布孔,每环16孔共11排试验孔,从桩号K14+560~580按2 m排距、沿洞轴中心线按22.5°发散布孔,每环16孔共10排试验孔,奇偶环交错布置。试验区孔位布置典型断面如图1所示。

收稿日期:2010-12-16

作者简介:邹刚(1970-),男(汉族),四川南部人,中国水利水电第七工程局成都水电建设工程有限公司高级工程师,水工专业,从事水电施工技术与管理,四川省成都市温江区公平镇正阳街10号,gcglbgs@126.com。

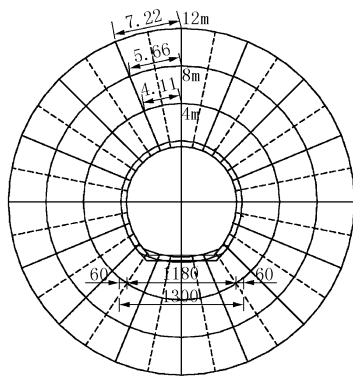


图 1 试验区孔位布置断面图

4.2 设计灌浆段长及灌浆压力

设计灌浆段长及灌浆压力如表 1 所示。

表 1 灌浆段长及压力设计表

灌浆孔深 /m	分段长度 /m	灌浆压力 /MPa	备注
12	0~4	6	无盖重固结灌浆试验洞段
	4~8		
	8~12		

4.3 浆液配比

纯水泥浆水灰比为 1~0.5(0.6);水泥砂浆水灰比为(0.38~0.42):1,水泥:砂为 1:(1~0.8);瓜米石配合比采用(0.38~0.45):1。

4.4 抬动变形观测

为了防止施工时压力升幅过快或过大引起围岩抬动变形,正式灌浆施工前我们在试验区共布置了 8 个抬动观测孔,孔位分布在底板、边墙和顶拱,覆盖了整个试验区域。

4.5 防渗标准

检查孔压水试验采用单点法,压水压力为灌浆压力的 80%,即 4.8 MPa。合格标准为:85%以上深部 8 m 试段的透水率 $\geq 1.0$  Lu,浅部 4~8 m 试段的透水率 $\geq 2.0$  Lu;其余 15%试段的透水率:深部 8 m 不超过 1.5 Lu,浅部 4~8 m 不超过 3.0 Lu,且分布不集中时为合格。

5 施工方法

5.1 施工流程

(1)施工顺序:按先底板孔、后腰线以下孔、最后腰线以下孔的顺序进行施工。各施工区域内孔施工时严格按照环间分序、环内加密的原则进行。

(2)工艺流程:抬动观测孔钻孔及抬动装置安装→灌浆声波测试孔钻进及测试→先导孔取心钻进、压水、灌浆→I 序环奇数孔钻孔灌浆→I 序环偶

数孔钻孔灌浆→II 序环奇数孔钻孔灌浆→II 序环偶数孔钻孔灌浆→检查孔压水→补灌孔钻孔灌浆→补灌后检查孔压水及声波测试。

5.2 钻孔施工

5.2.1 孔口管镶铸

为确保底板孔覆盖层段成孔及防止灌浆过程中有污水进入孔内,在底板孔钻进时先进行孔口管镶铸,孔口管孔径为 76 mm,长度 1~2 m 不等。采用潜孔钻造孔,用  $\varnothing 110$  mm 钻头钻进,成孔后置入一根  $\varnothing 76$  mm 孔口管(外露 0.1 m),扶正固定后注入水灰比为 0.5:1 的水泥浆将孔口管镶好。

5.2.2 抬动观测孔和声波孔施工

抬动观测孔采用风动潜孔钻机配冲击器及球齿钻头造孔,孔径为 91 mm,孔深  $L=12$  m,钻完后安设抬动观测装置。声波测试孔采用岩心钻机造孔,孔径为 56 mm,孔深  $L=12$  m。钻孔后进行全孔冲洗和灌前声波测试。

5.2.3 先导孔施工

底板先导孔采用孔径为 110 mm 跟管钻进到 1.5 m,埋设孔口管;其余钻孔孔径为 76 mm 钻孔取心,采用自上而下分段进行压水试验(单点法,1 MPa)、灌浆。

5.2.4 灌浆孔施工

由施工技术人员按施工图纸对固结灌浆试验段桩号进行确认无误,再进行试验区灌浆孔孔位放置,并且做好记录。根据施工工艺的不同,采用自上而下分段钻孔或自下而上一次性成孔。钻孔过程中,遇岩层、岩性变化,发生掉钻、坍孔、钻速变化、回水变色、失水、涌水等异常情况,均进行详细记录。

5.3 钻孔冲洗及压水试验

5.3.1 钻孔冲洗

灌浆孔钻孔结束后在灌浆前用压力水进行孔段冲洗,直至回水清净为止或不大于 20 min,冲洗压力 $\geq 1$  MPa。

5.3.2 单点法压水试验

灌浆孔在冲洗后进行压水试验,试验孔数为所有 I 序孔,采用单点法压水,压水试验压力 1.0 MPa;稳定标准为:在稳定压力下每隔 5 min 测读一次压入流量,连续 4 次读数中最大值与最小值之差小于最终值的 10%,或最大值与最小值之差小于 1 L/min 时,即可结束压水,以最终压力阶段压力值及相应流量计算透水率。

5.3.3 简易压水

所有 II 序孔均结合裂隙冲洗进行简易压水,压

水时间 20 min,每 5 min 测读一次压入流量,取最后的流量作为计算流量,其成果以透水率表示。

5.4 灌浆施工

灌浆主要采用变频高压注浆泵进行自上而下分段卡塞、纯压式灌浆。开灌水灰比采用 1: 1,变浆标准主要参考《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》(DL/T 5148-2001),结束标准为各段在设计规定的灌浆压力下流量 < 1 L/min 时,持续灌注 30 min 结束该段灌浆。灌浆记录采用 JT-4 型三参数记录仪对灌浆过程流量、密度、压力详细记录。

6 试验成果

6.1 试验区单耗指标

根据试验数据分析,本试验段各种排距单位耗浆量指标见表 2。

表 2 各排距单位耗浆量

序号	类别	包括大吸浆	除去大吸浆量
		量平均指标 /(kg·m <sup>-1</sup> )	后平均指标 /(kg·m <sup>-1</sup> )
1	1.5 m 排距平均单耗	258.0	150.0
2	2 m 排距平均单耗	225.8	205.7
3	3 m 排距平均单耗	460.6	294.2
4	2 m 排距米洞段单耗指标	12836.5 kg/米洞段	
5	3 m 排距米洞段单耗指标	11334.7 kg/米洞段	

6.2 压水试验成果

6.2.1 第一次成果检查

(1)2 m 排距试验区。2 m 排距试验区 4~8 m 段检查孔成果:共计单点法压水 20 段,合格孔段 20 段,检查孔最大透水率 1.85 Lu,最小透水率 0.02

Lu,平均透水率 0.86 Lu,合格率 100%,满足设计要求;2 m 排距试验区 8~12 m 段检查孔成果:共计压水 20 段,合格孔段为 18 段,不合格孔段分别为 J-12、J-18 号,透水率分别为 3.44、5.05 Lu,合格孔段的平均透水率 0.54 Lu,合格率 90%,满足设计要求。由于不合格的孔段透水率超过设计标准 1.5 Lu,故需对不合格孔段采取补灌措施,直至合格为止。

(2)3 m 排距试验区。3 m 排距试验区 4~8 m 段检查孔成果:共计单点法压水 19 段,合格孔段 14 段,有 4 段小于 3 Lu,有 1 段超过 3 Lu,合格率 73.7%,不合格孔段占 17.3%,不满足设计要求;3 m 排距试验区 8~12 m 段检查孔成果:共计压水 19 段,0~1 Lu 的有 9 段,1~1.5 Lu 的有 5 段,超过 1.5 Lu 的有 5 段,合格率 47.4%,最大透水率 6.59 Lu,最小透水率 0.50 Lu,平均透水率 1.71 Lu,不满足设计要求。故 3 m 排距试验区灌后检查孔合格率 4~12 m 均不满足设计要求,需对其进行加密灌浆处理。

6.2.2 补灌后检查孔成果

经过加密补灌和对第一次检查不合格检查孔灌浆处理后,再系统布置检查孔进行全试验区检查,检查孔压水压力仍使用灌浆压力的 80% (4.8 MPa),通过资料统计,3 m 试验区第二次检查孔全部合格,2 m 区局部加密后检查孔压水也全部合格,所有检查孔压水全部满足设计要求,合格率达 100%。

6.3 灌前灌后声波测试成果

6.3.1 灌前声波测试成果(见表 3)

表 3 引(2)14+530~580 m 防渗固结灌浆试验洞段灌浆前检测成果统计表

检测孔部位		孔号	孔深 /m	纵波速度 $V_p/(m \cdot s^{-1})$					
				0~4.0 m 段		4.0~8.0 m 段		8.0~12.0 m 段	
				$V_p$ 范围	$V_p$ 平均	$V_p$ 范围	$V_p$ 平均	$V_p$ 范围	$V_p$ 平均
引(2)14+579 m	左腰线	S-1	12.0	1550~6410	3470	5950~6580	6300	1720~6760	4820
引(2)14+577 m	右腰线	S-2	12.0	1670~5950	3200	5560~6250	6000	5810~6410	6190
引(2)14+575 m	底板	S-3	12.0	1620~5680	4450	3970~6250	5590	5000~5950	5690
引(2)14+573 m	顶拱	S-4	12.0	5210~6410	6010	4900~6580	6150	5950~6940	6410
引(2)14+569 m	左腰线	S-5	12.0	1580~5950	3270	1630~6250	4100	6060~6760	6410
引(2)14+565 m	右腰线	S-6	12.0	2170~5100	3130	2720~6250	5570	5810~6580	6140
引(2)14+561 m	底板	S-7	12.0	2140~6580	5510	5950~6580	6370	5560~6760	6430

灌浆段灌前 7 个孔 4.0 m~孔底段纵波波速 < 5000 m/s 的测点占总测点数的 15.7%,其中,波速 < 4250 m/s 的测点占总测点数的 10.1%。

6.3.2 灌后声波测试成果(见表 4)

灌后 7 个检测孔 4.0 m~孔底段,纵波波速 < 5000 m/s 的测点占总测点数的 10.0%,其中,波速

< 4250 m/s 的测点占总测点数的 1.2%。GHS-5 号孔灌浆检测不合格,其余检测孔灌浆检测均合格。

6.3.3 灌浆前后综合对比分析

通过对 2 号引水隧洞引(2)14+530~580 m 防渗固结灌浆试验洞段灌浆声波检测资料分析,可得出如下结论:

表 4 引(2)14+530~580 m 防渗固结灌浆试验洞段灌浆后检测成果统计表

检测孔部位		孔号	孔深 /m	纵波速度 $V_P/(m \cdot s^{-1})$					
				0 ~ 4.0 m 段		4.0 ~ 8.0 m 段		8.0 ~ 12.0 m 段	
				$V_P$ 范围	$V_P$ 平均	$V_P$ 范围	$V_P$ 平均	$V_P$ 范围	$V_P$ 平均
引(2)14 + 579 m	左腰线	GHS - 1	12.0	1610 ~ 5950	4590	5680 ~ 6410	6110	4720 ~ 6580	5910
引(2)14 + 577 m	右腰线	GHS - 2	12.0	2910 ~ 6100	5130	5680 ~ 6580	6140	6250 ~ 6760	6550
引(2)14 + 575 m	底板	GHS - 3	12.0	3010 ~ 6410	5440	6100 ~ 6580	6340	6100 ~ 6760	6510
引(2)14 + 573 m	顶拱	GHS - 4	12.0	2290 ~ 6760	4990	5950 ~ 6760	6430	4630 ~ 6760	6150
引(2)14 + 569 m	左腰线	GHS - 5	12.0	1750 ~ 5560	3990	4900 ~ 5950	5480	5560 ~ 6100	5800
引(2)14 + 565 m	右腰线	GHS - 6	12.0	1560 ~ 6250	4120	4390 ~ 6580	5850	5810 ~ 6410	6150
引(2)14 + 561 m	底板	GHS - 7	12.0	5680 ~ 6410	6170	5320 ~ 6250	5940	5950 ~ 6760	6340

(1)GHS-5 号孔灌浆检测不合格,其余 15 个检测孔灌浆检测均合格;

(2)灌前 17 个孔 4.0 m~孔底段纵波波速 < 5000 m/s 的测点占总测点数的 15.7%,其中,波速 <4250 m/s 的测点占总测点数的 10.1%;灌后 16 个检测孔 4.0 m~孔底段,纵波波速 <5000 m/s 的测点占总测点数的 10.0%,其中,波速 <4250 m/s 的测点占总测点数的 1.2%;

(3)灌后  $V_p$  平均波速值略高于灌前,平均增长率为 3.6%。

6.4 浆液扩散半径成果分析

通过浆液扩散半径成果来看,2 m 排距试验区 2~15 号孔发现多处部位有水泥结石,4~6 号孔岩石比较完整,未见有大的裂隙及水泥结石情况。3 m 排距试验区 14~15、9~10、20~15 号等孔均处于较破碎地带,该区域岩溶现象较发育,岩石透水性较好,部分岩心表面发现有水泥结石充填于裂隙中,形成致密的胶结体,发现水泥结石的部位主要在 8 m 以内的深度。

7 结论与建议

7.1 推荐的灌浆参数

(1)灌浆孔深、孔距:根据灌浆试验成果,建议系统固结灌浆中,将孔排距调整为 2 m 为宜,在地质条件较差的洞段,除将孔排距调整为 2 m 排距外,还将环孔间距由原 16 孔/环调整为 20 孔/环为宜。

(2)灌浆水灰比:根据灌浆试验成果,建议对于 I 序环孔、II 序环奇数孔、宽大裂隙或溶腔的灌注,采用 1~0.5 的浆液灌注;对于 II 序环偶数孔(最后次序孔),适当降低开灌水灰比,以稀浆来灌注细微裂隙岩层,进一步保障受灌岩体达到设计防渗标准。

(3)灌浆分段及灌浆压力:根据灌浆试验成果,建议灌浆段长划分为 4~8 m、8~12 m 两段,灌浆压力为 6 MPa。

(4)结束标准和封孔:根据灌浆试验成果,采用自上而下分段灌浆,在设计规定的稳定灌浆压力(6 MPa)下,当注入率  $\geq 1$  L/min,继续灌注 30 min,可结束灌浆;若采用自下而上分段灌浆,在设计规定的稳定灌浆压力下,当注入率  $\geq 1$  L/min 时,灌浆孔深部段继续灌注 10 min,可结束灌浆,孔口段,吸浆量  $\geq 1$  L/min,继续灌注 30 min,可结束灌浆。

7.2 推荐的灌浆工艺

在高压灌浆试验过程中,我们在 I 序环孔中主要采用了自上而下分段纯压式卡塞灌浆工艺,在 II 序环孔的灌注和补灌孔的灌注施工过程中,均采用了自下而上分段纯压式卡塞的灌浆工艺,从施工过程和施工结果来看,均满足施工要求。由于自下而上灌浆施工效率远远高于自上而上灌浆施工效率,通过试验验证对灌浆质量无影响,建议今后在大规模灌浆施工中, I 序环孔采用自上而下分段纯压式卡塞灌浆工艺、II 序环孔采用自下而上分段纯压式卡塞灌浆工艺,小循环灌浆系统。

参考文献:

[1] 刘正峰.地基与基础工程新技术实用手册[M].北京:新潮出版社,2001.

[2] DL/T5148-2001,水工建筑物水泥灌浆施工技术规范[S].

[3] 董哲仁.堤防除险加固实用技术[M].北京:水利电力出版社,2004.

[4] 王胜,黄润秋,祝华平,等.锦屏一级水电站煌斑岩脉化学复合灌浆试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(11):60-64.