

# Comprehensive Treatment Technology for Complex Geological Conditions of the Left Resisting Rock of Jinping I Hydropower

Yong Wang Hua Xiao Huaguo Tang

Chengdu Hydroelectricity Construction Engineering Co., Ltd., of Sinohydro Bureau No. 7 Company, Chengdu, Sichuan, 611130, China

## Abstract

The left resistance rock of Jinping I Hydropower Station has arranged the underground caverns with the most complex geological conditions and the most complex caverns in the history of hydropower construction in the world. In the process, successful examples of successful excavation without any safety accidents and good investment control have been realized, especially by the one-time water storage to the normal water level of Jinping I Hydropower Station, it is proved that the basic treatment scheme is reasonable and the treatment effect is good. In particular, it is proved that the basic treatment scheme is reasonable and the treatment effect is good after the one-time water storage of Jinping I Hydropower Station to the normal water level. This paper analyzes and introduces the successful excavation and grouting of the left resistance rock of Jinping I Hydropower Station from the aspects of project management and engineering technology, which can provide successful experience for similar projects.

## Keywords

300-meter arch dam; highest double-curved arch dam; complex geology; geological conditions; comprehensive treatment

# 锦屏一级水电站左岸抗力体复杂地质条件综合处理技术

王勇 肖铨 汤华国

中国水利水电第七工程局成都水电建设工程有限公司, 中国·四川成都 611130

## 摘要

锦屏一级水电站工程左岸抗力体布置了国际上水电建设史上地质条件最复杂、洞形最复杂的地下洞室群,过程中实现了成功开挖且无任何安全事故、投资控制良好的成功实例,特别是经锦屏一级水电站一次性蓄水至正常蓄水位证明,所确定的基础处理方案合理,处理效果良好。论文从工程项目管理、工程技术两方面对锦屏一级左岸抗力体成功开挖及灌浆进行了分析介绍,可为类似工程建设提供成功的经验。

## 关键词

300米级拱坝;最高双曲拱坝;复杂地质;地质条件;综合处理

## 1 引言

世界第一高坝,锦屏一级水电站于2014年8月24日一次性顺利蓄到正常蓄水位EL1880,经2个月安全监测数据分析证明,备受业内高度关注的左岸抗力体应力应变及渗流参压值全部在设计范围内,大坝运行状况良好。“地质是个框,什么都往里面装”,这句话反应了长期以来复杂地质条件中施工管理易出现各类安全、质量及投资控制问题,而锦屏一级水电站左岸抗力体在具有非常复杂地质条件和尚未经历过的施工难度,但经参建各方的9年精心管理,树立了过程控制和结果都十分完美的成功典型。论文对锦屏一级水电站左

岸抗力体施工过程中的重难点进行分析,重点就如何进行精细化专业化管理克服这些难题进行分析和介绍。

## 2 锦屏一级左岸抗力体加固工程的重点和难点

### 2.1 左岸抗力体地质条件复杂且处理效果决定工程成败

锦屏一级拱坝左岸地质条件十分复杂,抗力体范围内主要的地质缺陷有f5与f8断层,煌斑岩脉、深部裂缝、层间挤压及拉裂松弛岩体等,这些地质缺陷结构松弛、变形模量低,不能满足工程建设要求。锦屏一级水电站断层分布及左岸抗力体固结灌浆处理对象位置示意图1。

锦屏一级电站混凝土双曲拱坝高 305m，正常蓄水位时，坝体承受总水推力近 1200 万 t。工程规模巨大、拱坝特高、地震烈度高（基本烈度Ⅶ度）等工程特点要求抗力体一定要具有足够的强度和刚度、要满足拱座抗渗稳定和拱坝整体稳定，同时要具有抗渗性和渗透稳定性，以及在水长期作用下的耐久性。

因此，左岸抗力体在建设期间能否保证整个左岸边坡安全，工程建设后能否满足特高拱坝对抗力体力学指标的要求，是决定整个锦屏工程成败的关键因素。

## 2.2 左岸抗力体工程施工难度巨大

为处理左岸抗力体的地质缺陷，在顺河向 320m、垂直水流方向 290m、高差 250m 的抗力体范围内，布置了 5 层共 70 条断面不同的次通道、固结灌浆洞，帷幕灌浆洞、煌斑岩脉置换平洞及斜井、F5 断层置换平洞和斜井、洞井总长共计 12Km，整个洞群如迷宫一样复杂。锦屏一级水电站左岸抗力体洞室群布置见图 2。

为满足软弱岩体置换的要求及后期灌浆的需要，左岸抗力体的软弱岩带范围内，布置了断面尺寸各异的 3 岔口、4 岔口甚至 5 岔口。这给洞室开挖的爆破设计、支护和混凝土衬砌都带来很多难题和挑战。

恶劣地质条件下平洞和斜井追踪开挖施工难度巨大，其它地下工程特点是：哪里岩体差，就尽量避开。锦屏一级左岸抗力体却是进行软弱岩带（F5、f<sub>42-9</sub>、煌斑岩脉等）追踪开挖，即哪里岩体差，就往哪里挖，而且，抗力体采空率平面投影高达 50%。

因此，锦屏一级水电站左岸抗力体开挖工程，被专家称为目前水电建设史上施工难度最大、安全风险最大的地下洞群工程。

由于锦屏一级水电站左岸抗力体的巨大施工难度，也是

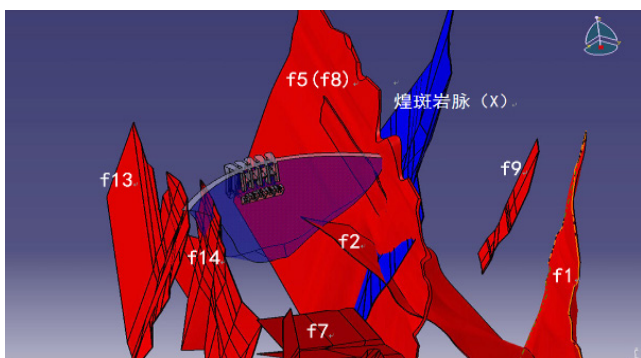


图 1 锦屏一级水电站断层分布及左岸抗力体固结灌浆处理对象示意图

锦屏工程成败的关键，因此抗力体施工一直深受各级领导、专家和院士的高度<sup>[1]</sup>。

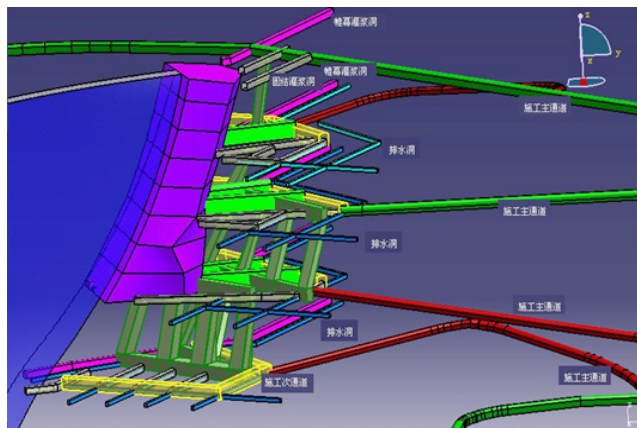


图 2 锦屏一级水电站左岸抗力体洞室群分布图

## 3 复杂地质条件开挖施工管理及方法

左岸抗力体范围内的洞室群均采用常规的钻爆法施工，本文仅对水电工程施工中鲜有类似经验的软弱岩带置换开挖、煌斑岩脉斜井置换，f5 断层斜井置换等施工项目进行介绍。

### 3.1 断层及煌斑岩脉平洞追踪置换开挖主要管理措施

通常地下工程设计原则是隧洞尽量以大交角穿过断层等不良地质条件，以减小施工难度和工程安全风险。而左岸抗力体内软弱岩带置换平洞却是追踪着断层及煌斑岩脉开挖，其洞室的围岩顶拱稳定及施工安全问题突出。施工过程中采取了以下主要技术和管理措施：

- (1) 选派地质经验丰富的工程师参与业主组建的地质追踪小组，实时进行地质预报，并快速根据地质变化调整钻爆及支护方案；
- (2) 对不同洞室的地质情况，做好爆破试验工作，加强爆破震动和变形观测，及时调整爆破参数，并严格按照爆破试验参数施工；
- (3) 科学合理制定开挖、支护及混凝土施工的程序和方法，严格按“预支护、短进尺、弱爆破、强支护、快封闭、勤观测”的原则施工，稳步推进；
- (4) 开挖成形后立即安装测点进行观测，为确定支护时机、选择临时支护方式、优化支护参数，调整开挖支护程序提供指导。遇上特殊情况，增加监测仪器测次的同时，加强巡视检查密度。

### 3.2 煌斑岩脉竖井置换开挖施工方法

左岸抗力体共布置有 7 条煌斑岩脉置换斜（竖）井，每条井长度约（45~50m），斜井开挖尺寸为 15 × Bm（长 × 宽，B 值根据煌斑岩脉宽度调整，最小宽度 5m）。

尽管新鲜的煌斑岩脉具有较好的岩性,但具有遇水软化的显著特点,在斜井开挖过程中,极易造成井身塌方。而能否使用反井钻机在煌斑岩脉中完成斜井出渣导孔,是斜井施工能否成功的关键。因此首先进行了反井钻机钻 $\Phi 1.4\text{m}$ 的导井试验。

采用LM-280型反井钻机,沿着煌斑岩脉的产状钻 $\Phi 220\text{mm}$ 的导孔,然后自下而上反拉 $\Phi 1400\text{mm}$ 出渣导井。经实践证明,使用反井钻机能成功地完成煌斑岩脉置换斜井出渣导井的开挖,工效约为1孔(50m)/周。

为防止斜井煌斑岩脉开挖暴露后遇水软化发生塌方,设计提出了混凝土跟进开挖的要求,但这引起了如何解决因爆破对新浇混凝土产生破坏的施工难题,且对施工组织及工期极为不利。经业主、监理及施工方研究确定,增加施工期斜井内安全监测设施,如多点位移计、锚杆测力计等来加强岩体应力应变监测。加强井口混凝土衬砌并增加中隔墙,采用型钢加强井身段的临时支护措施。经实践证明,可将整个斜井分三段(井口段4m,以下按20m左右)进行混凝土衬砌施工。有效地解决了混凝土爆破破坏及工期问题。

### 3.3 f5 断层竖井置换开挖施工方法

相对煌斑岩脉斜井,f5断层竖井施工难度更大。具有反井钻机钻导孔难以成孔,断层遇水泥化严重,直接造成塌孔的难题,且断层的走向没有规律,如2#斜井在井身20m处由上部3m发展到17m宽,形成倒斜井壁。

左岸抗力体共布置有4条f5断层置换斜(竖)井,每条井长度约(50~60m),斜井开挖尺寸为 $15 \times B\text{m}$ (长 $\times$ 宽,B值根据f5断层宽度调整,最小宽度6.5m)。

经深入研究,采取了以下措施:在反井钻机施工前,进行超前固结灌浆,以减小反井钻钻孔难度并防止井身爆破塌方;尽量找准f5断层的倾角及走向、主断层及影响带的宽度,溜渣导井尽量避开主断层布置;加强井身临时支护的同时,混凝土衬砌与撑子面保持适当距离;从地质条件相对较好的f5断层斜井中开挖支洞通向相邻斜井塌孔处,解决断层塌孔堵井并辅助出渣。

经采取上述有针对性地措施,f5断层斜井实现了安全高效施工。

## 4 复杂地质条件灌浆施工管理

锦屏一级水电站左岸抗力体范围内有高压固结灌浆及帷幕灌浆。由于煌斑岩脉及断层等部分岩体可灌性差,在水泥灌

浆的基础上增加了大量的高渗透性环氧树脂灌浆。而灌浆作为隐蔽工程,施工过程控制困难、灌浆效果直接影响到大坝的安全运行,因此灌浆质量管理是本项目管理的重点和难点。

### 4.1 左岸抗力体灌浆的难点和特点

左岸抗力体范围内高压固结、帷幕灌浆量超过100万 $\text{m}^3$ ,是水电建设史上空前绝后的灌浆工程。保证高压灌浆期间整个左岸边坡的稳定,是锦屏一级水电站施工过程中的非常重要的安全任务,而灌浆效果能否满足大坝运行的安全,是决定整个锦屏工程成败的关键。

由于受固结灌浆洞室布置的影响,固结灌浆孔布置具有从孔口向底部发散布置,洞室的底板、边墙及顶拱都布孔的环形布置特点,再加上煌斑岩脉、断层及深部拉裂缝等地质缺陷,造成灌浆的技术参数需根据地质及布孔情况不断调整、灌浆单元质量评审工作难度大。

### 4.2 灌浆管理采取的主要方法

管理局针对新任务、新挑战,前瞻性地组建灌浆领导工作小组,下设灌浆工作小组。灌浆领导工作小组定期召开会议,解决重大施工技术问题,并指导灌浆工作小组的工作。灌浆工作小组负责灌浆的日常管理,主要是所有技术问题的研究及确定、灌浆质量及计量的管理。

#### 4.2.1 灌浆工作领导小组的职责

灌浆工作领导小组的成员为业主,设计、施工及监理各单位现场第一负责人,灌浆领导小组职责为:

①确定工作目标、工作方针和工作制度;②随灌浆工程施工进展按月定期召开工作会,听取灌浆现场工作组的汇报并对灌浆现场工作组的工作进行检查;③根据灌浆现场工作组组长或副组长的要求,对涉及工程施工进度目标、工程变更和工程安全等重大事项进行决策;④结合工作进展,不断完善灌浆现场工作组的组织和工作制度。使工作组的工作能更好地适应推进工程建设按预定目标进展的需要。

#### 4.2.2 灌浆工作小组的职责

灌浆工作小组的成员为业主、设计、施工及监理单位的领导副职及专业工程师,灌浆现场工作组职责为:①灌浆现场工作组主要采取召开定期碰头会或不定期,如开现场会的形式开展工作;②设计单位根据地质钻孔岩芯及素描资料、钻孔电视资料、物探检测分析成果及安全监测资料,对灌浆设计优化调整和设计交底,并对下阶段施工提出指导性意见;③监理工

程师负责组织并主持现场工作会。及时收集并汇总承包商在施工过程中反馈的施工工艺问题,提交在灌浆现场工作组会上进行议定。根据承包商提供的岩芯素描,发现岩芯素描与地质预报或设计图不符,及时协调设计地质工程师、现场设代进行优化调整。督促承建单位落实现场工作会确定的事项,推进工程施工顺利进行。组织对每一个灌浆单元的评审工作;④承建单位地质工程师,应随灌浆进展做好岩芯素描。若岩芯素描反映的地质情况与地质预报或设计图不符,应及时向灌浆现场工作组报告,以利灌浆现场工作组及时研究、制定处理方案。不断地对灌浆施工工艺、灌浆参数进行摸索,发现问题及时向监理工程师汇报,并在灌浆现场工作组中提出合理的意见和建议供各方讨论;⑤根据所面临情况的重要和紧急程度,灌浆现场工作组可以先行决策执行,再按管理局的规定办理相关手续。对于重要的情况,应及时向灌浆领导小组汇报,并为灌浆领导小组决策快速提供相关信息<sup>[2]</sup>。

## 5 创新研究多种工艺攻克 f5 加固处理难题

f5 断层地质条件复杂,多为泥沙或砂砾石组成,断层母岩自身强度不高,处于高压压缩应力状态下,采用普通水泥浆对断层加固效果差,因此研究采用化学灌浆方法进行处理。

f5 断层灌浆前及经过水泥—化学灌浆后, f5 断层力求达到设计指标见表 1。

### 5.1 第一阶段化学灌浆试验研究

锦屏一级工程于 2006 年开始,进行第一阶段 f5 断层化学灌浆试验研究。根据化学灌浆室内试验成果,选定 JX-B、JX-C、JX-D 三个配比的浆液用于现场化学灌浆试验。浆液的固结时间为 32~75 小时;胶凝体 30 天抗压强度约 50 MPa, 90 天抗约 60 MPa; 30 天抗拉强度约 12 MPa, 90 天抗拉强度约 15 MPa; 30 天抗剪强度约 7 MPa, 90 天抗剪强度约 8 MPa; 30 天弹性模量约 7GPa, 90 天弹性模量抗约 7.5 GPa。

灌前岩体声波平均波速仅 4100m/s, 平均变模值介于 3.05GPa ~ 3.54GPa, 但小值平均 1~2 GPa; 经化学灌浆后平均波速介于 4500m/s ~ 5000m/s, 平均变模值 4~4.5Pa, 小值平均 2~2.5 GPa。但由于一些测点的变模值太低无法测得,没有纳入统计,因此实际小值平均变模应低于统计值。

化学灌浆灌后检查孔钻孔取芯中取得了较好的化学浆液结石,说明 JX 系列环氧树脂灌浆材料对断层影响带能取得较好的效果,但对断层泥和糜棱岩,仍无法渗透进去,难以提高

断层泥力学指标,现场的钻孔变模因太低而无法测得<sup>[3]</sup>。

## 5.2 第二阶段化学灌浆试验研究

2011 年开始进行第二阶段 f5 断层化学灌浆试验研究。本次试验是在以前取得的经验的基础上,重点提高的环氧树脂材料的渗透性和可操作时间,所使用的 PSI 系列材料的具有亲水性兼憎水性,内聚力强,能与水形成稳定界面的特点。能以浆排水,不需丙酮或甲苯、异内醇等有机溶剂作为先导浆排水或形成浆、水阻隔层的措施,能较好的保证灌浆效果。

### 5.2.1 锦屏一级高渗透性环氧树脂的特性

- (1) 环氧树脂浆液具有一定的亲水性能。
- (2) 环氧树脂浆液与软岩的亲合力强。
- (3) 环氧树脂浆液固化体具较高的力学性能。
- (4) 环氧树脂浆液具有较低起始粘度和较长可操作时间。

### 5.2.2 化学灌浆处理效果

锦屏一级各断层经化学灌浆后岩体检测指标见表 2。

f5 断层带多为泥沙或砂砾石组成,断层母岩自身强度不高,处于高压压缩应力状态下,化学浆液进入的比例有限,因此通过水泥—化学灌浆手段虽然较大程度上提高岩体的完整性和力学性能指标,但是对软弱的糜棱岩、断层泥要达到的纵波波速 >4500m/s 及变形模量 >5GPa 的设计要求,这对于水泥—化学灌浆材料、施工方法等都具有很大的挑战,需进一步对材料和现场工工艺进行研究。且针对较宽大断层采用环氧树脂化学灌浆,不仅处理效果难以完全满足要求,而且处理单位体积的岩体费用相对较高。因此,锦屏建设管理局组织研究采用高压水对穿冲洗断层并回填混凝土的方法,来处理发育宽大断层。

## 5.3 f5 断层高压水冲洗置换

由于在 el.1730m 以下 f5 断层及影响带高宽达 7m 以上,且无法通过开挖置换的办法处理,经化学灌浆试验证明对断层泥处理效果欠佳。因此,在 el.1730m 置换竖井之间的断层中,进行了高压对穿冲洗试验,以验证该方案对 f5 断层处理的可行性,并获得所采用的施工设备的施工效率,以进行施工进度分析;验证断层通过高压对穿冲洗后,回填灌注回填细石混凝土对 f5 断层带力学指标提高的幅度。

### 5.3.1 高压水冲洗置换的方法

本次试验从 1730m 高程顺断层钻孔至 1670m 高程,然后

采用高压风、水冲洗 f5 断层软弱带内充填的断层泥、泥化的糜棱岩。钻孔完毕后，将喷具下入孔内，利用高压风、水将断层切割破坏扰动，在风水联动作用下将搅动后的泥浆及细小颗粒沿通道流入 1670-f5 置换洞内，以达到类似爆破开挖清除断层及影响带的效果。冲洗结束后采用自下而上分层进行回填自密式混凝土。高压对穿冲洗钻孔布置见图 3，施工现场情况见图 4。

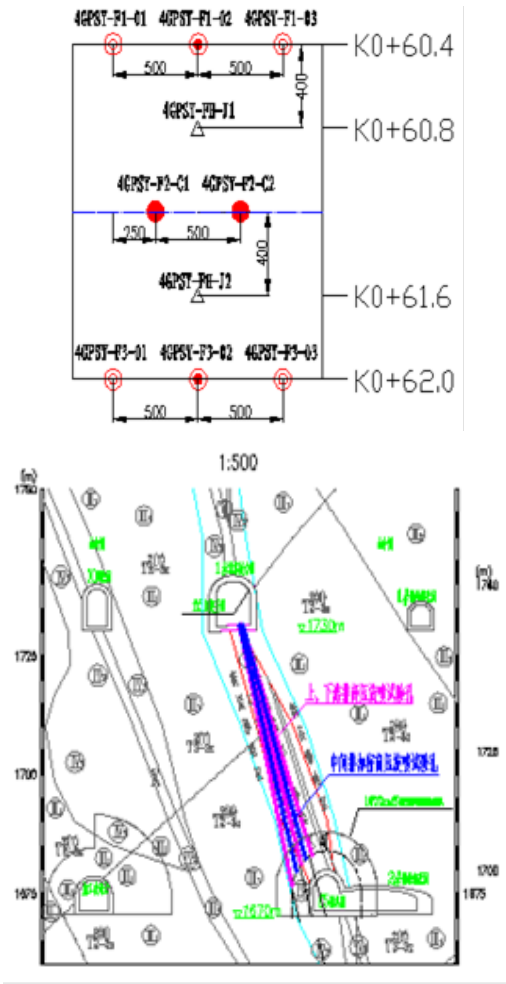


图 3 el.1670m~el.1730m 廊道间高压水对穿冲洗置换面孔图



1670m 出渣情况 (2012.1.12)



1670m 出渣情况 (2012.1.15)

图 4 EL1670m 廊道高压水对穿冲洗置换施工现场图

### 5.3.2 试验区布孔形式及工程量

为摸索不同孔距的高压水冲洗效果，结合现场实际情况布置了 5 个高压对穿冲洗试验孔 (GDCX-01-01、GDCX-01-02、GDCX-02-01、GDCX-03-01、GDCX-03-02)，其中 GDCX-01-01、GDCX-01-02、GDCX-02-01 呈等腰三角形布置，孔间距为 1.2m，GDCX-02-01、GDCX-03-01、GDCX-03-02 呈等腰三角形布置，孔间距为 0.8m。冲洗总工程量为 287.8m。

### 5.3.3 高喷冲洗试验设备

钻孔采用阿特拉斯 A66CB 多功能全液压履带式钻机，对穿冲洗采用 XL-50 型旋喷机，采用 ZJB(BP)-50 变频高喷灌浆泵，额定压力 50MPa，流量 0~100L/min。

### 5.3.4 高压冲洗参数

高压冲洗施工技术参数见表 3 所示。

表 3 高压水冲洗置换施工参数表

项目	技术参数	相应要求	备注
高压水	35 ~ 40MPa		清水
风压	1.0 ~ 1.5MPa	随孔深增加而适当调整	置换用风
提升速度 (V)	5 ~ 8cm/min	根据地层实际情况可适当调整参数	
旋转速度	10 ~ 15r/min		

### 5.3.5 f5 断层高压水冲洗置换处理方案评价

采用高压水冲洗置换处理的方案，具有施工安全，施工效率高等优点，经估算，工程造价约为钻爆法开挖斜井的 70%，工期为钻爆法开挖的 50%。但缺点是冲洗的效果只能靠冲洗水颜色来推断，无法确保将软弱岩体全部冲洗置出去，可能在回填混凝土和岩体之间残留一些断层泥。因此，为取

得更好的处理效果,需进一步用灌浆(包括化学灌浆)方法来弥补这一缺陷。

## 6 经验和结论

### 6.1 基础处理项目必须成立有业主牵头组成的联合领导小组

由于基础处理的复杂性,常常采用一种工艺,方法无法解决所有的问题,必须有针对性的结合地质条件,现场灵活运用基础处理方面相关方法,可能会多种方法叠加;水电工程由于其规模巨大,地质勘探总是有限的,设计方案确定是居于有限地质资料确定,施工中根据地质情况变化,及时研究和做出恰当的决策显得更加重要。因此,自工程开工就应该成立由业主牵头组成的联合领导小组,任务就是,根据实际揭示的地质情况对招标设计方案进行快速复核和决策,确保施工安全和工程本身安全。

### 6.2 加强地质研究工作,做到有的放矢

由于基础处理的复杂性和特殊性,施灌对象往往为由不同地质条件组织,而基础处理过程中,对地质的认识和掌握就尤其重要,常言道:事预则立,不预则废,工程规模大、

技术复杂、地质条件恶劣,业主从设计方案决策、项目分标、招标文件编制、评标、施工队伍的考察和选定、监理队伍的选定、业主项目管理人员的筛选,都事先进行了精心策划和慎重研究。确保世界级的项目有一流的设计、一流的施工队伍、一流的监理人员、一流的项目管理人员。

### 6.3 加大科技创新,解决过程中的疑难杂症

通过设计及施工单位大胆创新和科技攻关,如采用了高渗透性环氧树脂灌浆及高压水对穿冲洗置换等先进工艺。施工过程中,采用信息化管理及动态设计管理,选派经验丰富的工程师常驻现场,根据地质编录、安全监测和物探检测提供信息,在业主的组织下参建各方根据揭示的地质情况,优化减少了置换的工程量,加快了施工进度,确保了工程安全。

## 参考文献

- [1] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院.雅砻江锦屏一级水电站可行性研究报告,2003.
- [2] 《水利水电工程施工地质规程》(DL/T5109)
- [3] 《水工建筑物地下开挖工程施工技术规范》(DL/T5099-1999)