

# 黏土混凝土防渗墙检测技术研究及应用

楼加丁, 刘骅标, 叶勇, 江晓涛

(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:**塑性混凝土作为防渗墙墙体材料根据其抗压强度和弹性模量,可分为刚性和柔性材料。防渗墙体的强度、弹性模量、渗透系数等指标,需进行了配合比试验,筛选出了符合工程要求的施工配合比。防渗墙施工质量的检测一直是个棘手的问题,传统检测手段还是靠钻孔取芯,对芯样进行室内力学试验,检测方法不仅单一,而且破坏原防渗墙结构。本文根据实际情况,利用防渗墙体的预埋管,采用无损检测方法,在满足工程质量检测同时,又能提高检测效率,实践证明,采用综合检测手段能满足塑性混凝土质量要求。

**关键词:**黏土混凝土芯墙;技术指标;质量检测;质量评价

**中图分类号:** TU528.32; TV223.4+2; V448.15+1

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1001-2184(2015)06-0164-05

## 0 引言

塑性混凝土防渗墙具有良好的防渗性能与弹性模量变化大的特点,在水利工程加固处理中得到较为广泛应用,据有关资料查找(不完全统计),我国在1965年金川峡水库采用塑性混凝土防渗墙后,已有近百座水库采用黏土混凝土防渗墙,墙厚60~100 cm,墙深在20~100 m之间,抗渗等级可达到W8。塑性混凝土防渗墙根据其抗压强度和弹性模量,可分为刚性和柔性材料,两种材料作防渗墙均能满足大竹河水库大坝渗漏处理要求,但从防渗的可靠性、耐久性、工程的重要性以及施工的方便性考虑,选取了黏土混凝土防渗墙方案。

防渗墙受施工方法和各中实际因素的影响,容易出现浇筑不均匀、分层、夹泥等现象,有必要对防渗墙质量检测方法进行研究<sup>[7]</sup>。文献<sup>[1-6]</sup>中提出了无损检测方法,对工程质量控制起到好的效果,但从检测方法角度上考虑不够完善,地质雷达和垂直反射法检测深度有限;地震波CT虽能直观反映墙体介质分布的连续性及存在的缺陷<sup>[6]</sup>,但由于地震波频率低,检测精度受到限制;单孔声波虽然能检测微小的缺陷,但只局限于钻孔中;声波对穿也受限于钻孔,穿透距离仅为3 m左右。水利水电防渗墙施工规范明确规定质量检查在28 d后进行,采用的手段可用钻孔取芯和无损检测。笔者从工程实际出发,利用防渗墙上的

少量钻孔<sup>[13]</sup>,采用综合的检测方法<sup>[3]</sup>,进行墙体质量评价,达到预期的检测目的。

## 1 黏土混凝土芯墙的技术指标

在混凝土中掺加一定量的黏土,不仅可以节约水泥,还可以降低混凝土的弹性模量,使混凝土具有更好的变形性能,同时也改变了混凝土的和易性便于钻凿接头孔。影响黏土混凝土防渗墙强度最重要的因素是水灰比,其次是掺土率,掺土率越大,弹性模量越低,但掺土率达到一定程度后则变化不大。有关试验表明<sup>[14]</sup>,只掺膨润土的塑性混凝土和只掺黏土的混凝土及同时掺加膨润土和黏土的塑性混凝土的在抗压强度(R)和弹性模量(E)存在一定相关关系,这就决定了黏土混凝土配合比设计的难度和复杂性。黏土混凝土防渗墙主要适用于中等水头的大坝或基础的防渗体,配合比的特点是水泥用量比黏土混凝土少,具有初始弹性模量低,极限变形大,渗透系数低的特点,能适应较大的变形,有利于改善防渗墙体的应力状态。长江委设计院对四川攀枝花大竹河水库黏土混凝土芯墙提出了以下具体指标:抗压强度R28 ! 10 MPa;弹性模量E0 " 15 000 MPa;渗透系数K " 1 × 10<sup>-7</sup> cm/s;抗渗等级W8;浇筑时混凝土坍落度要求在18~24 cm;凝结时间:初凝 > 6.0 h,终凝 < 24.0 h。

## 2 黏土混凝土芯墙质量检测方法

建成后的黏土防渗墙的强度和弹性模量等力学指标,一般不宜通过打孔取芯检测获取,通常采

收稿日期:2015-11-11

用对机口取样 28 d 后在室内试验,对照设计指标,作出正确评价。在施工中,黏土混凝土防渗墙体有自身的特点,需进行严谨的施工和有效的质量监控措施<sup>[8]</sup>。黏土混凝土防渗墙的质量检测,主要针对已浇筑的黏土混凝土的物理力学性能的检查,包括抗压强度、弹性模量、抗渗标号(或抗渗系数)、防渗墙连续性和接头孔的连接质量<sup>[9]</sup>,宜采用无损的检测方法。因受到客观条件、检测手段、精度、认识局限性等多要素影响,检测方应根据设计提出的混凝土质量指标,提出具体检测方案和检测手段,以无损方法为主,配合少量钻孔取芯,达到控制防渗墙质量目的<sup>[10-13]</sup>。大竹河水库黏土渗墙质量检查采用的方法为钻孔取芯法、超声波法、层析成像(CT)、钻孔弹模、注水试验及岩芯样室内试验等。

表 1 大竹河水库防渗墙检测单孔声波测试成果表

孔号	孔深 /m	测试日期	波速 /m · s <sup>-1</sup>		同槽段试块平均波速 /m · s <sup>-1</sup>
			波速区间	平均波速	
QTZK-1	0~20.0	2014.7.15	2 960~3 430	3 080	3 170
QTZK-3	0~19.0	2014.8.6	2 960~3 450	3 090	3 180
QTZK-5	0~15.2	2014.8.11	2 990~3 450	3 100	3 200

### 3.2 钻孔全景数字成像

对防渗墙上实施的 3 个取芯孔均进行了钻孔全景数字成像。从钻孔全景数字成像图及所取的芯样观察可知:3 个钻孔的全景图像绝大部分均匀、光滑平整,墙体混凝土胶结密实,未发现明显不良缺陷(图 1-a);仅在 QTZK-3 号孔深 16.7

## 3 黏土混凝土芯墙质量评价

### 3.1 单孔声波检测

采用特殊施工的钻探工艺,在芯墙上钻取 3 个近 20 m 深的孔(表 1)。在孔中均进行了单孔声波测试,波速在 2 960~3 450 m/s 之间,平均波速 3 090 m/s。由于三个孔成孔时间不同,波速略有差异,随着时间推移,平均波速略有增加,但增加幅度不大。

防渗墙材料为 C10 黏土混凝土,根据业主及施工单位现场在 DF-6、DF-8、DF-10、DF-18、DF-20、DF-24、DF-32、DF-35 槽段所取 30 个试块在达到养护期后进行了波速测试,波速在 2 950~3 400 m/s 之间,平均波速为 3 180 m/s。对照试取芯孔所在坝段对应的试块波速测试值,检查孔平均波值比试块平均波速值低约 100 m/s。

~16.8 m 存在粘土搅拌不匀或密实度稍差之微小缺陷(图 1-b);在 QTZK-5 孔深 10.8 m 左右发现细微裂缝,裂缝长 10 cm 左右,仅在孔壁一侧面可见,并未贯穿墙体,不影响墙体质量(图 1-c)。

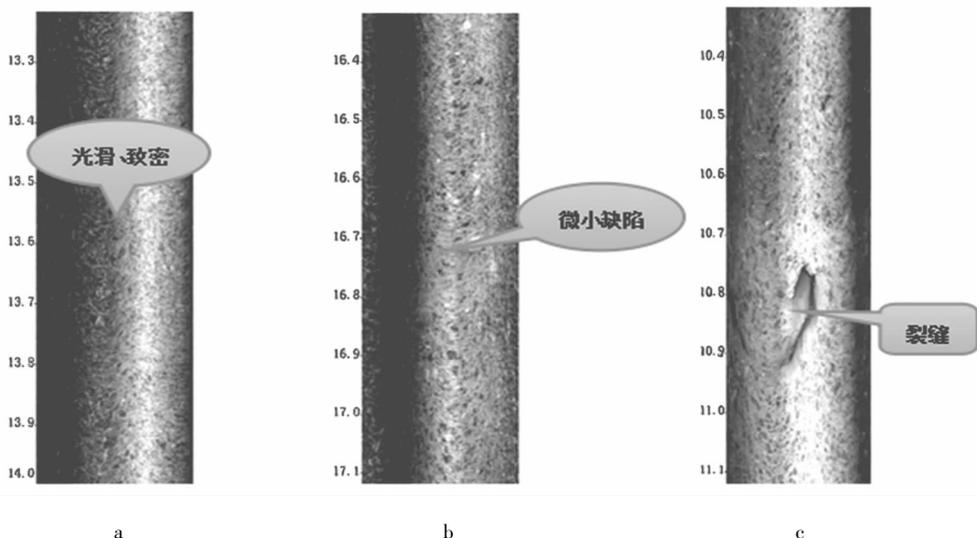


图 1 防渗墙钻孔全景数字成像图

### 3.3 钻孔动弹模量

在防渗墙上实施的两个检查孔进行了钻孔弹性模量测试,共完成了14个点的弹性模量测试工作,弹性模量值在7.2~9.4 GPa之间,平均8.4 GPa。测试数据显示,随着测试深度增加,弹性模量值也略有降低,墙体实测的弹性模量值略低于设计要求。

### 3.4 注水试验

在防渗墙的3个钻孔中进行了10段注水试验,注水试验结果显示( $9.98 \times 10^{-8} \sim 6.1 \times 10^{-7}$  cm/s),防渗墙黏土混凝土的渗透系数在 $4.99 \times 10^{-8} \sim 6.1 \times 10^{-7}$  cm/s之间,均满足设计要求。

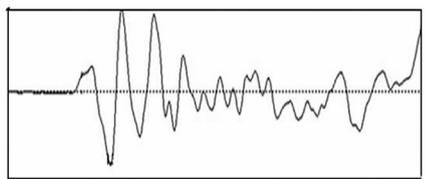
### 3.5 声波CT

防渗墙及墙下帷幕声波CT检测分2个阶段进行,第一阶段是利用在防渗墙施工中预埋

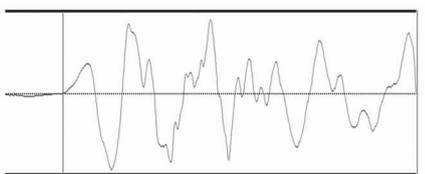
的帷幕灌浆管孔进行墙体质量检测;第二阶段是利用在防渗墙施工中预埋管对墙下帷幕灌浆质量孔进行检测。以防渗墙中某典型CT剖面中不同深度的波速和频率进行综合分析,该剖面深度35 m,黏土混凝土防渗墙深31.5 m,31.5 m以下为基岩。

#### 3.5.1 波速

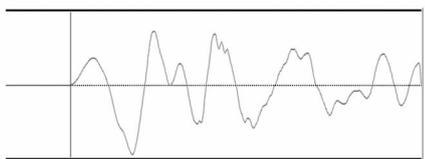
岩体的波速是评价岩体的强度与完整性重要参数之一。从下图2中可看到,黏土混凝土防渗墙体大功率波速在2 850~3 600 m/s之间,平均波速为3 350 m/s;波速从上到下逐渐递减是由于防渗墙的混凝土凝受当地特殊气候的影响,上部凝固快,下部凝固慢。进入基岩后波速上升速度变的很快,除基岩与防渗墙接触带波速略低于基岩外,下部岩体较完整(图2)。



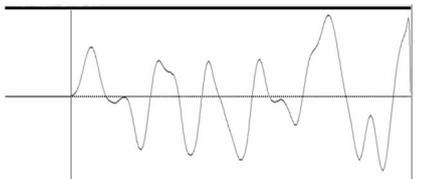
1 m 处波形及主频图(声时 3.20 ms,波速 3 570 m/s,主频 631 Hz)



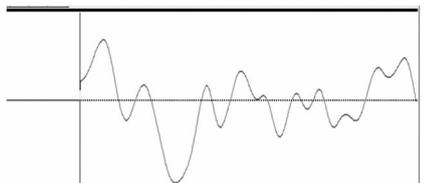
2 m 处波形及主频图(声时 3.32 ms,波速 3 430 m/s,主频 423 Hz)



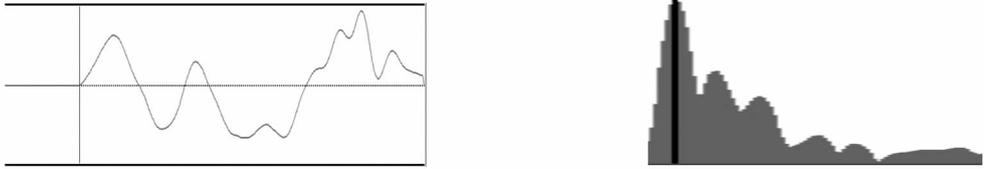
3 m 处波形及主频图(声时 3.40 ms,波速 3 350 m/s,主频 357 Hz)



6 m 处波形及主频图(声时 3.50 ms,波速 3 260 m/s,主频 232 Hz)



13 m 处波形及主频图(声时 3.68 ms,波速 3 100 m/s,主频 152 Hz)



20 m 处波形及主频图(声时 3.82 ms,波速 2 980 m/s,主频 79 Hz)



25 m 处波形及主频图(声时 4.00 ms,波速 2 850 m/s,主频 70 Hz)

图2 防渗墙不同深度的声波 CT 波形和对应频谱图

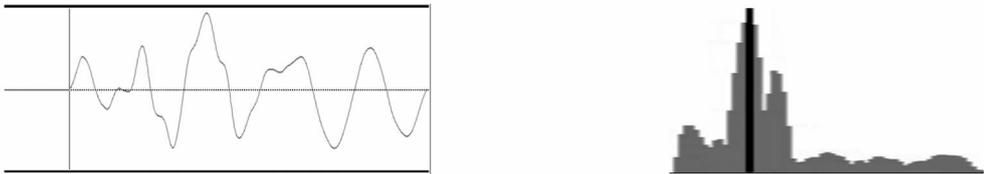
### 3.5.2 防渗墙声波 CT 主频分析

波速虽然是评价岩体的强度与完整性重要参数,但岩体的频率也是一个非常重要的参数。声波传播过程中的主频变化也可以从另一个方面评价岩体的强度、致密性与完整性。一般情况下,声波的主频(核心频率)越高则说明岩体的致密性越好,强度越高,对于混凝土中细微的缺陷(如裂缝等)用波速值无法判断,通常只能借助于频率

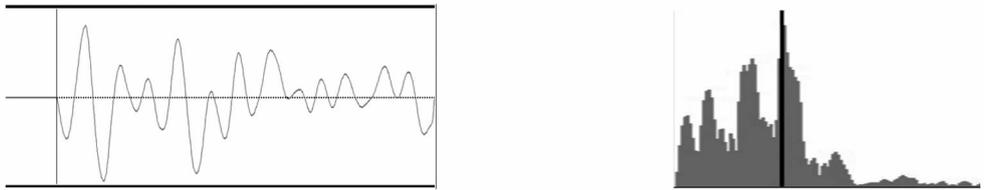
变化来判断。从图3可知32 m处是防渗墙与基岩的接触带,波形和对应的频谱值与上部黏土混凝土和下部基岩有很大改变。

### 3.5.3 防渗墙下基岩声波 CT 主频分析

在防渗墙和基岩接触带频率和波速变化都很大(图3),进入基岩后,底部岩体不发生变化,频率和波速基本不变。



32 m 处波形及主频图(声时 2.60 ms,波速 4 380 m/s,主频 392 Hz)



35 m 处波形及主频图(声时 2.0 ms,波速 5 700 m/s,主频 769 Hz)

图3 防渗墙下基岩声波 CT 波形和对应频谱图

### 3.5.4 综合分析

声波 CT 检测过程中发现墙体不同深度其波速差异不大,而主频变化梯度较大。表2对防渗墙上所有 CT 剖面的主频、特征波速值进行了分段统计,波速和主频随深度的变化见图4-1和图4-2。近地表1~3 m,防渗墙的平均波速! 3 400 m/s,主频一般大于 450 Hz,说明近地表深度范围内黏土混凝土由于地表温度高,混凝土固结

快,强度较高、致密性较好;深度在3~8 m的范围内,声波主频主频从 450 Hz 降到 200 Hz 左右,平均波速为 3 250 m/s,波速变化较小,说明混凝土固结稍慢,强度及致密性没有近地表混凝土好;9~25 m 频率在 200~100 Hz 之间变化,平均波速在 3 050 m/s;随着深度增加频率衰减变缓,25 m 以下频率低于 100 Hz,平均波速为 2 960 m/s,波速与频率逐渐趋于稳定。

表 2 大竹河水库防渗墙声波 CT、主频段统计表

主频、波速分段统计							
主频 > 450 Hz		450 Hz < 主频 " 200 Hz		100 Hz " 主频 < 200 Hz		主频 < 100 Hz	
深度 /m	波速特征值 /m · s <sup>-1</sup>	深度 /m	特征波速值 /m · s <sup>-1</sup>	深度 /m	波速特征值 /m · s <sup>-1</sup>	深度 /m	波速特征值 /m · s <sup>-1</sup>
" 3	3 400	3 < H " 8	3 250	8 < H " 15	3 050	! 15	2 960

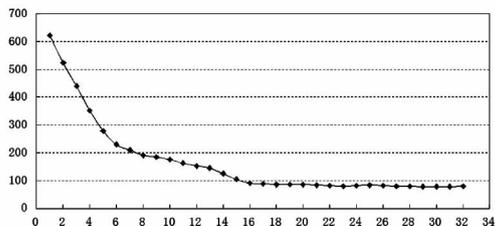


图 4-1 波速随深度变化趋势图

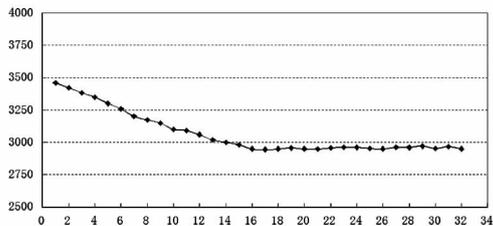


图 4-2 主频随深度变化趋势图

### 3.6 岩芯样室内试验

对防渗墙上的 QTZK - 1、QTZK - 3 和 QTZK - 5 共计 3 个钻孔,进行了 7 组试验,试验参数包

括密度、抗压强度、弹性模量、三轴试验、渗透系数及渗透比降、抗渗等级等,试验和钻孔中无损检测结果见表 3。

表 3 大竹河水库防渗墙声波室内试验、无损检测结果统计表

芯样号	室内试验方法				无损检测			
	密度 /kg · m <sup>-3</sup>	抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	抗渗等级	波速 /m · s <sup>-1</sup>	波速 /m · s <sup>-1</sup>	动弹性模量 /GPa	注水试验
QTZK - 1	2 235	15.1	12.0	≥ W8	3 190	2 960 ~ 3 430	8.4	6.23 × 10 <sup>-8</sup>
QTZK - 3	2 430	15.9	13.5	≥ W8	3 210	2 960 ~ 3 450	8.5	7.47 × 10 <sup>-8</sup>
QTZK - 5	2 248	13.4	9.4	≥ W8	3 160	2 990 ~ 3 450	8.3	3.55 × 10 <sup>-7</sup>
平均值	2 304	14.8	11.6	≥ W8	3 180	3 090	8.4	1.64 × 10 <sup>-7</sup>

黏土混凝土墙体波速在 2 960 ~ 3 450 m/s 之间,满足 C10 黏土混凝土波速要求(试块波速在 2 950 ~ 3 400 m/s 之间,平均 3 180 m/s)。黏土混凝土防渗墙力学指标:抗压强度 10.9 ~ 19.6 MPa,平均 14.8 MPa;弹性模量 8.6 ~ 15.6 GPa,平均 11.6 GPa;渗透系数 4.99 × 10<sup>-8</sup> ~ 6.1 × 10<sup>-7</sup> cm/s;抗渗等级达到 W8,黏土混凝土防渗墙较均质,墙体未发现较大的缺陷,仅局部存在粘土搅拌不匀或密实度稍差之微小缺陷,防渗墙施工质量符合设计要求。

### 4 结 语

大竹河水库工程防渗墙质量检测采用了以无损检测为主,配合少量钻孔并在钻孔中进行波速和弹模测试。试验和无损检测结果表明,防渗墙墙体整体均匀,致密性较好,墙体底部淤积少;局部致密性略差,平均波速大于 3 000 m/s,对应的混凝土强度为 10MPa 左右,经过近一年试蓄水检验,防渗墙施工的各项指标满足设计要求。

中提到的检测方法有钻孔取芯法、超声波法等,由于塑性混凝土的强度较低,不宜采用钻孔取芯的方法对成墙混凝土物理力学性能的检查,只能在混凝土浇筑时,现场取样成型试件,用试件的试验结果代替防渗墙的实际性能指标,这种检测法存在局限性,应采用无损检测方法全面检测防渗墙连续性和接头孔的连接质量。

塑性混凝土与常规混凝土防渗墙一样都需进行质量检测,由于塑性混凝土的发展史短,在建工程中塑性混凝土的防渗墙的配合比存在较大差异,在检测前应周密、详细地做好检测方案,检测方法也需进行相应的调整,防渗墙施工质量检测应在 28 天后。

#### 参考文献:

[1] 郭松昌,王卫东等. 探地雷达法和垂直反射法检测塑性混凝土防渗墙的适用性对比分析[J]. 河海水利,2012(1):42-45.  
 [2] 孙文怀,刘伟,李长征,张清明,王锐等. 地震波 CT 在塑性混凝土防渗墙检测中的应用[J]. 华北水利水电学院学报,2013,34(1):83-89.

(下转第 179 页)

无发热及异常声音,各模块电压、电流显示一致;充电柜各指示灯表完好并指示正常;充电柜监控模块无报警及异常信号。

(4)蓄电池检查:蓄电池支架,接头应清洁完好,焊接处无断线;蓄电池室通风装置运行良好,室温在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;蓄电池室内照明充足;蓄电池巡检仪接头清洁完好,巡检仪工作正常。

## 5.2 定期维护措施

(1)检修人员定期办理巡回工作票对直流系统设备进行清扫,保持设备整洁,保证设备工作环境正常。

(2)定期试验项目:设备参数定期核对检查,蓄电池充放电试验,充电模块手动均浮充转换试验,各充电模块输出电压调整校对,绝缘检测仪模拟接地告警试验,降压硅链手/自动试验,通讯试验等。

## 6 结语

从宝珠寺电站直流系统组成及故障处理的方法可以看出,在电力系统发生故障时,若供给继电器保护动作的直流系统出现问题,轻则将导致短路电流烧坏发供电设备,重则是造成整个电网崩溃严重影响国民经济发展。只有加强直流系统日常运行维护,并灵活掌握运用直流系统故障处理(上接第168页)

- [3] 葛双成,江影,颜学军. 综合物探技术在堤坝隐患探测中的应用[J]. 地球物理学进展,2006,21(1):263-272.
- [4] 葛双成,梁国钱,陆云祥,章晓桦,刘超英. 物探技术在防渗墙质量无损检测中的应用试验研究[J]. 工程勘察,2006(10):72-76.
- [5] 梁国钱,苏全,王文双,李波. 层析成像技术(CT)在拱坝质量检测中的应用[J]. 水力发电,2002(5):20-22.
- [6] 刘超英,梁国钱,孙伯永. 瞬态瑞雷波法在堤防防渗墙质量检测中的应用研究[J]. 岩土力学,2005,26(5):809-812.
- [7] 李晓明. 防渗墙工程质量的检测方法及应用[J]. 河南水利与南水北调,2011(16):105-106.
- [8] 姜葵红,和桂玲,杨国瑞,张兴珏,张新华. 混凝土防渗墙技术在日照水库除险加固工程中的应用[J]. 水利规划与设计,2007(4):59-62.
- [9] 孟令奎,吕文龙. 帷幕灌浆法处理塑性混凝土防渗墙接头缝[J]. 黑龙江水利科技,2008,36(6):190-191.
- [10] 高钟璞,安致文,王国民. 小浪底水利枢纽上游围

方法才能保证电站乃至整个电力系统的供电安全。由于直流系统故障现象处理较复杂,需要不断地实践、归纳和总结,才能进一步提高直流系统运行维护水平。

## 参考文献:

- [1] 姚春球. 发电厂电气部分[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 张希泰,陈康龙. 故障查找与故障分析处理指南[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.
- [3] 陈国庆,谢刚,吴丹青. 水电厂运行技术问答[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
- [4] 任煜峰. 水轮发电机组值班[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [5] 马立方. 变电站直流系统故障分析与处理[J]. 现代商贸工业,2011,15:274-275.
- [6] 余育金,田树军. 变电站直流系统接地故障分析及查找[J]. 广西:广西电力,2007.2:27-29.
- [7] 王旭荣. 浅谈变电站直流系统接地故障及处理[J]. 内蒙古:内蒙古石油化工,2008.21:77-78.

## 作者简介:

秦欢(1988-),女,四川隆昌人,毕业于华北电力大学科技学院电力及其自动化专业,助理工程师,现于宝珠寺水力发电厂从事水电站运行与调度工作;

张雯政(1989-),男,四川广元人,毕业于四川大学水利水电学院水文与水资源工程专业,助理工程师,现于宝珠寺水力发电厂从事发电调度工作。 (责任编辑:卓政昌)

- 堰塑性混凝土防渗墙的施工[J]. 水力发电,1994(3):10-13.
- [11] 陈武林. 塑性混凝土及其在三峡工程二期围堰防渗墙的应用研究综述[J]. 中国三峡建设,1996(7):20-24.
- [12] 李顺行,赵文权,宋双蕾. 岳城水库大副坝防渗墙塑性混凝土施工工艺及质量控制[J]. 河北水利水电技术,2002(3):3-4.
- [13] 史迅. 塑性混凝土防渗墙在三峡二期围堰中的应用[J]. 水利水电科技进展,2000,20(5):47-49.
- [14] 罗季英. 塑性混凝土配合比设计的研究[J]. 浙江水利科技,2001(S1):79-81.

## 作者简介:

楼加丁(1962-),男,贵州贵阳人,毕业于桂林理工大学地球物理专业,教授级高级工程师,主要从事水利水电工程物探研究及管理;

刘骅标(1989-),男,贵州贵阳人,毕业于贵州大学地质工程专业,助理工程师,主要从事工程地质方面工作;

叶勇(1960-),男,贵州贵阳人,毕业于贵州大学地质专业,高级工程师,主要从事工程地质方面工作;

江晓涛(1986-),男,重庆江津人,毕业于成都理工大学地球物理专业,助理工程师,主要从事工程物探方面工作。

(责任编辑:卓政昌)