

# 猴子岩水电站地下厂房施工期围岩变形特征分析

雷英成, 何刚

(四川中水成都勘测院工程物探检测有限公司, 四川 成都 610072)

**摘要:**猴子岩水电站地下厂房岩体具有地应力高、强度应力比低的特点, 在施工过程中出现岩体片帮、锚头内陷、喷混凝土层开裂等变形现象。研究成果表明: 未开挖时间段内围岩声波波速和卸荷松弛深度以没有明显变化为主; 开挖时间段内围岩岩体卸荷松弛深度多随逐层开挖由表及里增加、围岩声波波速多随逐层开挖由表及里衰减, 表明猴子岩水电站地下厂房岩体变形以开挖后应力释放致岩体损伤以为主。

**关键词:**水电站; 地下厂房; 围岩变形特征; 监测资料验证

**中图分类号:** [TM622]; TV731.6; P614

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1001-2184(2018)05-0103-04

## 0 引言

近年来, 西南地区一大批超大型水电工程正在或即将开工建设, 由于枢纽布置、施工等方面的需要, 这些水电站大都采用地下厂房, 因此必须开挖、修建、运行大型地下洞室群。然而, 由于西南地区处于青藏高原东缘横断山系高山峡谷地区, 河谷深切, 天然地应力高且分布不均匀, 同时岩体结构复杂, 软弱结构面发育, 岩体质量、施工周期及安全标准要求高, 施工程序复杂、难度大, 如二滩、锦屏、大岗山、长河坝、猴子岩等<sup>[1-4]</sup>, 迫切需要解决大型地下洞室围岩稳定性及其控制等一系列问题, 为工程建设和运行的安全提供保障。

猴子岩水电站地下厂房洞室群围岩质量较好, 围岩类别以Ⅲ1、Ⅲ2类为主, 局部为Ⅳ类, 完整(较完整)岩体声波波速一般分布在5 000~6 200 m/s, 实测最大主应力值36.43 MPa, 围岩强度应力比 $R_b/m = 2 \sim 4$ , 属于高地应力区。在开挖过程中, 围岩变形出现了位移量级偏大、局部变形不收敛、锚头内陷、岩锚梁错位、混凝土喷层开裂以及岩体劈裂等围岩变形特征<sup>[5]</sup>。根据该地下厂房4个高程共32个孔的长观声波监测成果分析地下厂房开挖期围岩变形特征。研究成果表明: (1) 未开挖时间段内围岩声波波速和卸荷松弛深度以没有明显变化为主; (2) 开挖时间段内围岩岩体卸荷松弛深度多随逐层开挖由表及里增加、围岩声波波速多随逐层开挖由表及里衰减, 表明猴子岩水电站地下厂房岩体变形以开挖后应力

释放致岩体损伤以为主。

## 1 工程概况

猴子岩水电站地下厂房系统布置在右岸280 m~510 m山体内部, 房区岩性为白云质灰岩、变质灰岩, 岩体中岩溶不发育, 仅见个别溶隙, 除断层带具较强透水性外, 中陡倾裂隙一般透水性较弱。地下厂房区无区域断裂通过, 据勘探平洞揭示, 厂区内上游侧发育一条规模较大的断层F1-1, 产状 $N60^\circ E / NW \angle 85^\circ$ , 主要由碎粒岩、碎粉岩组成, 主错带宽1.0 m~1.5 m, 碎粉岩带宽30 cm, 断层影响带宽约20 m, 断层处洞壁垮塌, 地下水沿断层股状流出。其它结构面主要有次级小断层23条、挤压破碎带42条和节理裂隙6组。厂房部位岩体完整性总体为较完整~完整。

## 2 施工期围岩变形特征

长观声波是观测洞室围岩声波速度与围岩松弛深度随地下厂房开挖而变化发展情况。在猴子岩水电站地下厂房主机间共布置4个长观声波检测断面, 其桩号分别为厂横0+008.80、厂横0+041.30、厂横0+073.80、厂横0+106.30(为避免长观声波检测孔与母线洞、压力管道等交叉, 在地下厂房主机间每台机组中心线向山里侧平移10米), 每断面布置12个长观声波检测孔, 上、下游边墙各6孔, 自上而下分别位于1 718 m、1 711 m、1 704 m、1 697 m、1 690 m、1 683 m等高程, 共计48个长观声波检测孔, 其中岩壁吊车梁高程附近1 718 m、1 711 m高程4孔孔深20 m, 其余孔深均15 m, 方向水平下斜, 如图1所示。

收稿日期: 2018-07-31

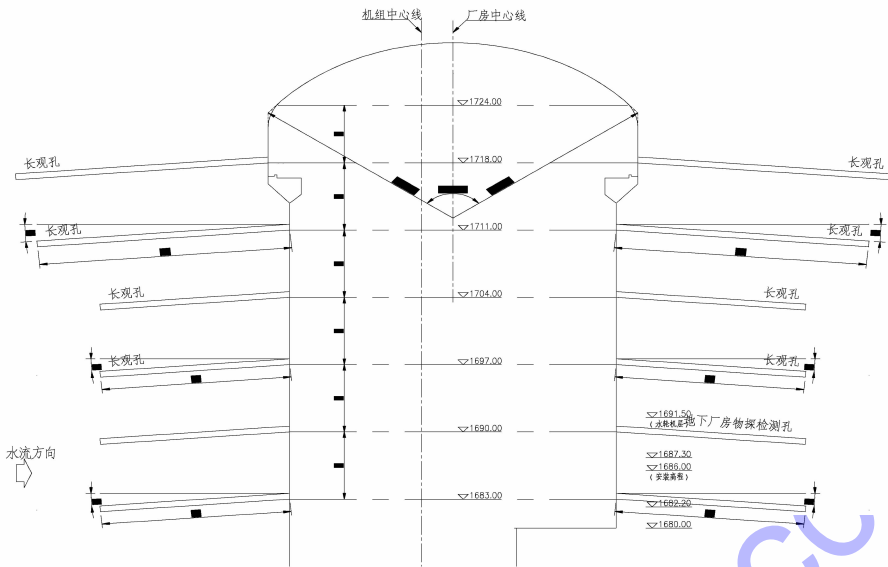


图1 地下厂房主机间长观声波检测孔位布置示意图

## 2.1 未开挖时段围岩变形特征

猴子岩水电站地下厂房围岩质量较好,围岩类别以Ⅲ1、Ⅲ2类为主,完整(较完整)岩体声波波速一般 $5\,000\text{ m/s} \sim 6\,200\text{ m/s}$ 不等。在未开挖时段,该水电站地下厂房 $1\,718\text{ m}$ 、 $1\,711\text{ m}$ 、 $1\,704\text{ m}$ 、 $1\,697\text{ m}$ 等4个高程共计32个长观声波孔在7天~60天时间段内共有26个长观声波孔围岩波速和松弛深度没有明显变化,所占比例为81.2%,其典型声波曲线如图2所示。其余6个长观声波孔围岩波速和松弛深度变化较小,围岩声波波速衰减一般小于10%,围岩松弛深度一般增加 $0.2 \sim 0.6\text{ m}$ 不等,所占比例为18.8%。

图1为 $1\,718\text{ m}$ 、 $1\,711\text{ m}$ 、 $1\,704\text{ m}$ 、 $1\,697\text{ m}$ 四个高程典型长观孔未开挖时段内声波曲线成果图。其中图2(1)~(4)的曲线1和曲线2为造孔后第1次、第2次或第3次观测结果(1 d, 14 d或28 d),期间地下厂房未下挖,由曲线1和曲线2可以对比发现地下厂房未下挖时长观声波曲线变化幅度小;图2(1)的曲线3和曲线4是 $1\,702\text{ m} \sim 1\,698\text{ m}$ 高程段(第IV-1层)开挖后和 $1\,698\text{ m} \sim 1\,694\text{ m}$ 高程段(第IV-2层)开挖前长观声波曲线图,由曲线3和曲线4可以对比发现地下厂房未下挖时长观声波曲线变化幅度小。

## 2.2 开挖时段围岩变形特征

猴子岩水电站地下厂房在 $1\,710\text{ m} \sim 1\,702\text{ m}$ 高程段(第III层)、 $1\,702\text{ m} \sim 1\,698\text{ m}$ 高程段(第

IV-1层)、 $1\,698\text{ m} \sim 1\,694\text{ m}$ 高程段(第IV-2层)等开挖时段内,完成 $1\,718\text{ m}$ 、 $1\,711\text{ m}$ 、 $1\,704\text{ m}$ 等3个高程共计18个长观声波孔(其中 $1\,718\text{ m}$ 高程8孔, $1\,711\text{ m}$ 高程8孔, $1\,704\text{ m}$ 高程2孔)观测工作,每个观测孔一般观测6~11次不等,一般每层开挖均进行了长观声波测试,为分析该水电站地下厂房围岩波速和松弛深度随开挖变形提供了第一手资料。依据长观声波成果,该水电站地下厂房在开挖阶段围岩变形主要分为急变型(所占比例78%)、缓变型(所占比例11%)、稳定型(所占比例11%)。

### 2.2.1 急变型

该水电站地下厂房开挖阶段急变型声波曲线如图3所示,其声波曲线典型特征为:1)岩体卸荷松弛深度随开挖成阶梯状由表及里增加;2)声波波速随开挖逐层由表及里衰减。在开挖阶段18个长观声波观测资料中,有14个观测孔具上述两个典型特征,所占比例为78%,主要集中在岩体条件稍差部位,如下游边墙厂横 $0+008$ 、厂横 $0+041$ 等。由图3可知,开挖后在 $1.85\text{ m}$ 处置处新增加一条张性裂隙,裂隙张开度约 $1.0\text{ mm}$ 。

### 2.2.2 缓变型

猴子岩水电站地下厂房开挖阶段缓变型声波曲线如图4所示,其声波曲线典型特征为:1)开挖前、后岩体声波波形曲线形态上总体一致;2)个别孔段声波波速随开挖由表及里有一定衰减,

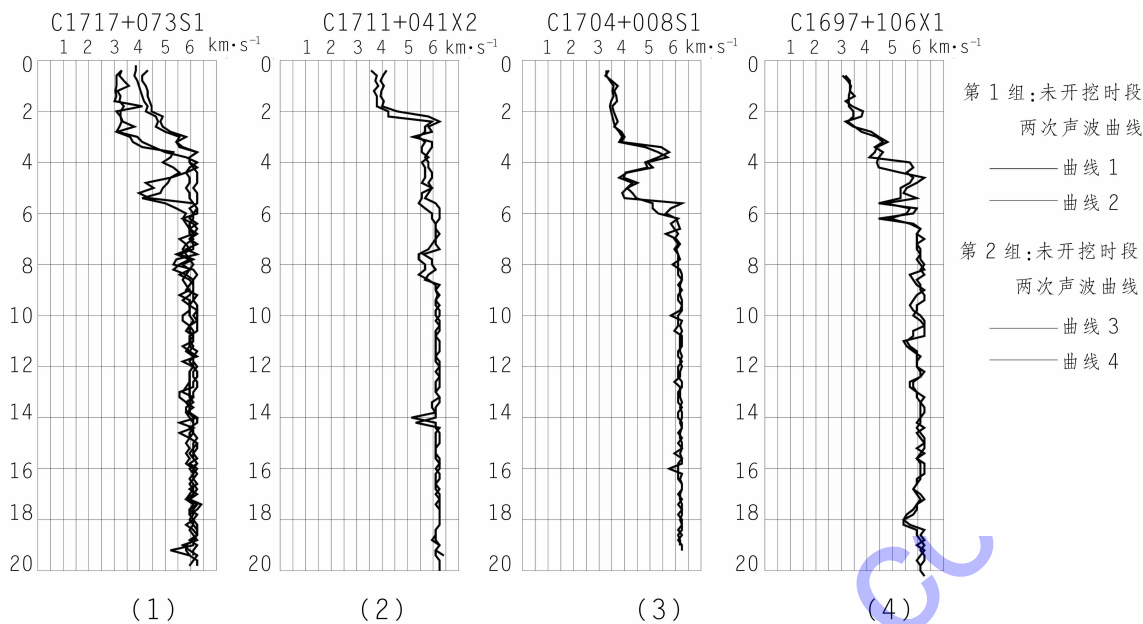


图2 未开挖时段围岩典型声波曲线

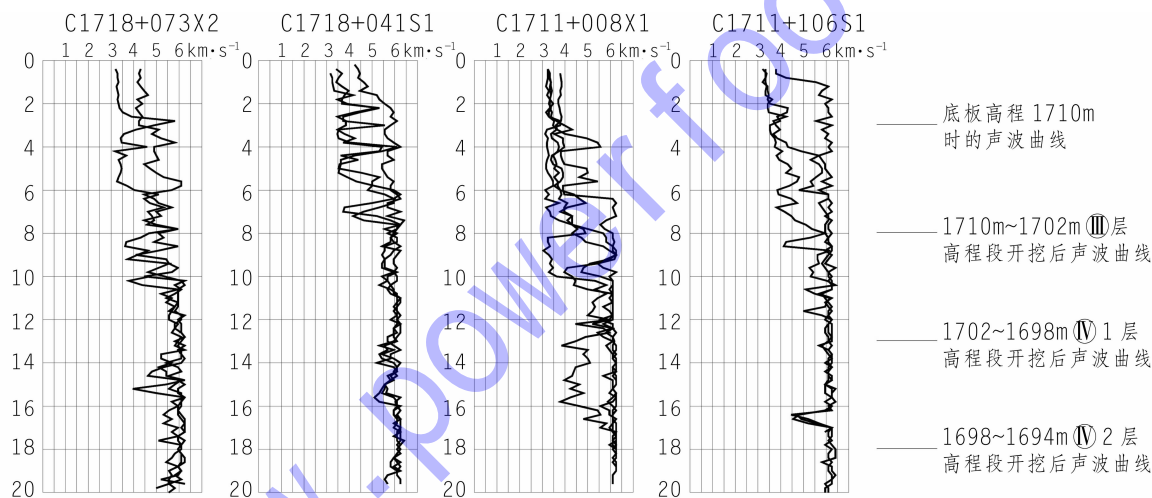


图3 开挖阶段急变型声波曲线

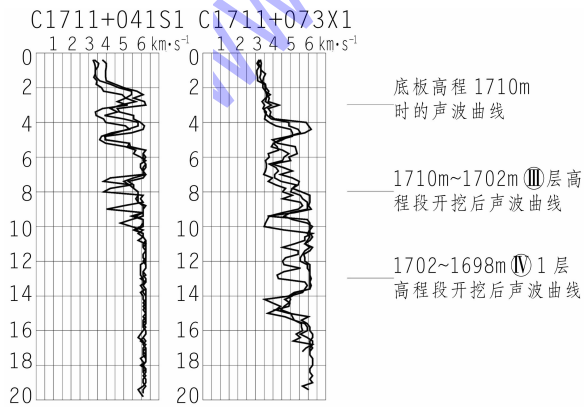


图4 开挖阶段缓变型声波曲线

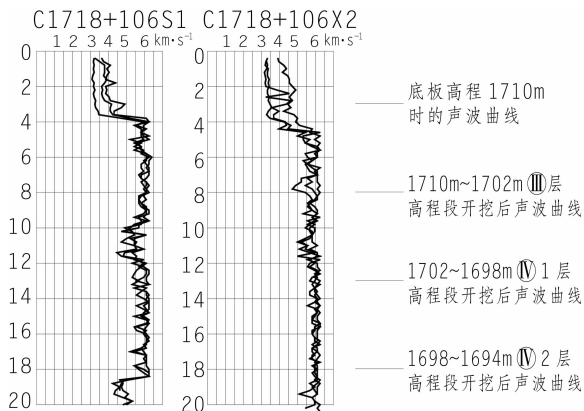
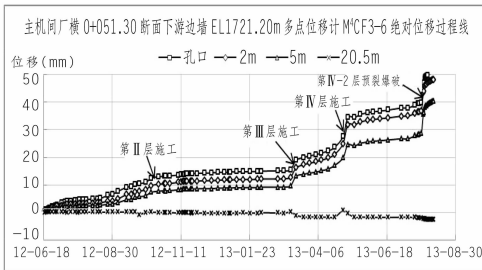


图5 开挖阶段稳定型声波曲线

衰减率一般小于 15% (相对于初次测试)。在开挖阶段 18 个长观声波观测资料中,有 2 个观测孔具上述两个典型特征,所占比例为 11%。

### 2.2.3 稳定型

该水电站地下厂房开挖阶段缓变型声波曲线如图 5 所示,其声波曲线典型特征为:1) 开挖前、后岩体声波波形曲线形态上总体一致;2) 声波波速随开挖衰减较少,衰减率一般小于 5%。在开挖阶段 18 个长观声波观测资料中,有 2 个观测孔具上述两个典型特征,所占比例为 11%。



## 2.3 监测资料验证

### 2.3.1 多点位移计监测

图 6 为该水电站地下厂房多点位移计典型曲线图。从图 6 可知:该水电站地下厂房多点位移计变化过程曲线多随开挖成层阶梯状变形,开挖时段内位移一般有突变,而未开挖期位移曲线一般平稳发展。根据王伟刚<sup>[5]</sup>统计,该水电站地下厂房洞室群绝大部分围岩变形过程呈现阶梯状发展,约占监测总量的 83%,与长观声波统计结果基本一致。

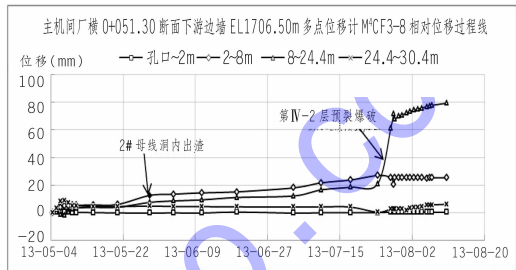


图 6 该水电站地下厂房多点位移计典型曲线图

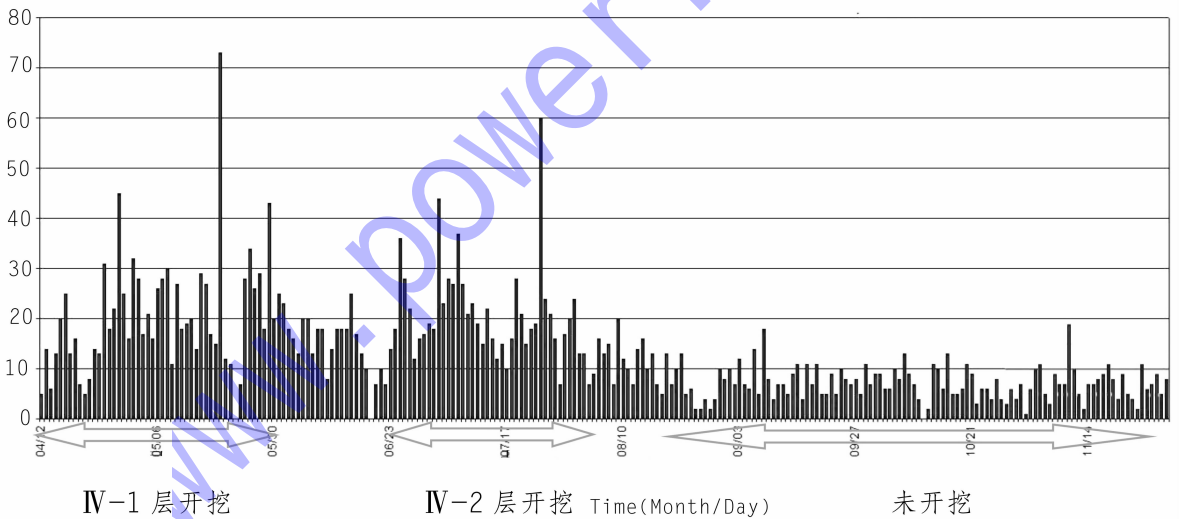


图 7 该水电站地下厂房微震事件柱状图

### 2.3.2 微震监测

图 7 是该水电站地下厂房微震监测微震日事件数量柱状图。由图 7 可知,1 702 m ~ 1 698 m 高程段(第 IV-1 层)、1 698 m ~ 1 694 m 高程段(第 IV-2 层)等开挖时段内岩体微震事件数量明显多余未开挖时间段内,微震事件数量多说明岩体损伤严重<sup>[6-7]</sup>。

## 3 结论

猴子岩水电站地下厂房具有地应力高、强度应力比低的特点,在施工过程中出现片帮、锚头内陷、混凝土喷层开裂等变形破坏现象。根据该地下厂房 4 个高程共 32 个孔的长观声波监测成果分析地下厂房开挖期围岩变形特征。研究成果表明:未开挖时间段内围岩声波波速和卸荷松弛深度以没有明显变化为主;开挖时间段内围岩岩体

(下转第 110 页)

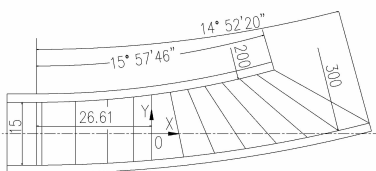
### 3 推荐挑坎体型

通过上述对比分析,本工程溢洪洞挑坎体型最终选择“扭曲斜切挑坎”,挑坎左、右侧边墙为朝向河心的圆弧边墙,左、右侧边墙半径分别为200 m和300 m;挑坎底板前段为反弧段,反弧半径90 m;后段底板在左、右侧采用在溢洪洞轴线方向的投影分别为半径200 m和90 m的圆弧与

边墙相接,底板中部为扭曲面,挑射角 $8^{\circ}4'59'' \sim 34^{\circ}3'7''$ 。

为了便于现场施工放线,根据上述设计要素对底板扭曲面进行拟合,以底板前段尾部和溢洪洞轴线交点为坐标原点,拟合后段底板扭曲面方程见表3,扭面中的任意一点可根据表中方程式联立求解求得。

表3 推荐挑坎平面图及底板扭面方程

挑坎平面图	底板扭面方程
	$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{207.5 - \sqrt{200^2 - (x_1+26.61)^2} - y}{\sqrt{300^2 - (x_2+26.61)^2} - \sqrt{200^2 - (x_1+26.61)^2} - 85x_2 - x_1}$ $= \frac{z-200 + \sqrt{200^2 - x_1^2}}{\sqrt{200^2 - x_1^2} - \sqrt{90^2 - x_2^2} - 110}$ $x_1 = 0.563\ 405\ 437x_2$ <p>式中 <math>x_1, x_2</math> 分别为底板与左、右挡墙交点;  <math>x, y, z</math> 为底板上所求点;                      曲面方程中单位为米。</p>

### 4 结语

在窄河谷高水头大泄量溢洪洞的挑流消能防冲设计中,挑坎体型的选择对消能防冲的效果有重要影响,如何解决挑射水流归槽、提高消能效果、减轻下游冲刷等均有很大难度。猴子岩水电站溢洪洞出口挑坎,结合水工模型试验,从水力学角度对比分析不同体型挑坎消能效果,最终选择“扭曲斜切挑坎”方案目前该工程已完建,并在低水位小流量情况下运行,运行后状况良好。

#### 参考文献:

[1] 水利水电泄水工程与高速水流信息网. 泄水工程与高速水流[M]. 长春:吉林科学技术出版社,1998.

[2] 沈长松,王世夏,林益才,等. 水工建筑物[M]. 北京:水利水电出版社,2008.

作者简介:  
 索慧敏(1980-),男,山西长子人,高级工程师,本科,主要从事水工设计工作;  
 窦向贤(1974-),男,安徽六安人,教授级高级工程师,硕士,主要从事水工设计工作;  
 吕海艳(1981-),女,吉林农安人,高级工程师,硕士,从事水工水力学模型试验研究. (责任编辑:卓政昌)

(上接第106页)

卸荷松弛深度多随逐层开挖由表及里增加、围岩声波波速多随逐层开挖由表及里衰减,表明猴子岩水电站地下厂房岩体变形以开挖后应力释放致岩体损伤以为主。这一结论可为同类高地应力条件下大型地下洞室群设计、开挖、支护等提供参考。

#### 参考文献:

[1] 魏进兵,邓建辉,王伟凯等. 锦屏一级水电站地下厂房围岩变形与破坏特征分析[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(6):1198~1205.

[2] 姚强,杨兴国,刘勇林等. 大型地下厂房洞室群施工工期围岩变形分析[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(5):1164~1169.

[3] 刘永波,左雷高,闵勇章. 长河坝水电站地下厂房围岩变形特征[J]. 四川水力发电,2016,35(1):49~53.

[4] 李志鹏,徐光黎,董家兴. 猴子岩水电站地下厂房洞室群施工工期围岩变形与破坏特征[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(11):2291~2300.

[5] 王伟凯,蔡德文,董瑜斐等. 猴子岩水电站地下厂房围岩变形特征分析与控制[J]. 人民长江,2014,45(8):66~84.

[6] 沙椿,李彪,徐奴文等. 地下洞室群开挖卸荷过程微震活动特征研究[J]. 长江科学院院报,2014,31(11):102~107.

[7] 戴峰,李彪,徐奴文. 猴子岩水电站深埋地下厂房开挖损伤区特征分析[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(4):735~746.

#### 作者简介:

雷英成(1986-),男,硕士研究生,工程师,国家注册岩土工程师,项目经理,现从事工程物探检测及监测相关工作;  
 何刚(1977-),男,博士,教授级高工,主要从事水电工程施工期和运行期物探检测工作. (责任编辑:卓政昌)