

# 白鹤滩水电站左岸地下厂房围岩破坏研究

刘思杰<sup>1</sup>, 王凯<sup>2</sup>, 蔡浩<sup>3</sup>

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443002; 3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

**摘要:** 为了研究白鹤滩水电站左岸地下厂房围岩变形破坏问题,通过对厂房的现场调查,对其基本破坏类型进行归纳:片帮剥落、围岩外鼓、围岩开裂,并存在渗漏、异类物质析出等现象。同时结合数值模拟,对开挖期间围岩破坏机理进行分析。结果表明:在开挖作用下,左岸地下厂房应力进行二次分布,并在上游顶拱、拱肩及边墙部位围岩形成多个应力集中区,超过围岩片帮破坏临界值,最终发生片帮等多种破坏。主厂房上游存在多个长大裂隙,其力学参数低,承载能力弱,在开挖作用下诱发主厂房上游发生诸如围岩外鼓折断、裂隙开裂、渗水、钙类物质析出等多种围岩破坏,并导致其临近区域应力异常增大,甚至出现片帮破坏。在后期开挖过程中应密切关注主厂房上游围岩稳定性。

**关键词:** 片帮破坏; 地应力; 围岩开裂; 围岩破坏; 地下厂房; 白鹤滩水电站

中图分类号:TV731.6

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2017)05-0232-05

## Study on damage mechanism of surrounding rock at the underground powerhouse of Baihetan hydropower station

LIU Sijie<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>2</sup>, CAI Hao<sup>3</sup>

(1. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China; 3. East China Investigation and Design Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Ltd., Hangzhou 311122, China)

**Abstract:** In order to study the deformation and damage of the surrounding rock of the left bank underground powerhouse of Baihetan Hydropower Station, through the field investigation of the main powerhouse, the primary destruction types are classified as rib spalling, bellying of surrounding; creepage and the precipitating of calcium. A calculation model was established to study the damage mechanism of the left bank underground powerhouse during excavation unloading. The result indicated that the geostress of the left bank underground powerhouse redistributes under the influence of the excavation, which results in several stress concentration at the roof of arch, spandrel and the sidewall of upside main powerhouse where the major principal stress exceeded critical value, leading to various damages of the surrounding rock. There were many long cracks with poor mechanical properties and weak carrying capacity, which will trigger bellying of surrounding, creepage and the precipitating of calcium in the upstream of the main powerhouse under excavation. And the cracks will induce abnormal increase of geostress in close region and rib spalling of the surrounding rock. The stability of the surrounding rock of the upstream should be paid close attention.

**Key words:** rib spalling; geostress; cracking of surrounding rock; damage of surrounding rock; underground powerhouse; Baihetan hydropower station

## 1 研究背景

金沙江白鹤滩水电站位于金沙江下游河段,是

金沙江下游四个梯级水电站中的第二级,位于四川省凉山州宁南县与云南省昭通市巧家县交界处。左右岸地下厂房各布置8台1000 MW发电机组,建成

收稿日期:2017-05-27; 修回日期:2017-06-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51374149)

作者简介:刘思杰(1994-),男,四川成都人,硕士研究生,研究方向为岩土工程灾害防治。

后将成为世界最大地下发电厂房。地下厂房分别布置于坝址区两岸山体内。两岸厂房区均由四大洞室组成,即主副厂房洞、主变洞、尾水管检修闸门室和尾水调压室,另外布置大量辅助洞室,洞室群极为复杂。在施工过程中大量出现片帮、坍塌、渗漏以及掉块等多种围岩破坏现象,严重威胁施工人员的生命财产安全,增加工程成本。其中左岸以片帮破坏最为严重,洞室群在开挖过程多次遭到此类破坏。片帮是指洞室开挖后,压力转移到四周围岩上,洞壁四周压力增加,形成应力集中区;围岩在附加荷载作用下,被压碎并挤向开挖区域,这种现象称为片帮。片帮作为一种围岩的宏观破坏现象,与岩爆一样常见于各类深部地下洞室工程,但是相对于岩爆,其烈度更弱,一般表现为岩块剥落,无弹射现象。在已竣工的猴子岩、锦屏一级、锦屏二级、官地等水电站中均遇到过不同程度的片帮破坏问题。

对于片帮的形成机制、特征及其规律的研究,始于1980年Hoek等<sup>[1]</sup>对南非石英围岩脆性破坏的编录及其分析,在此案例中,岩石单轴抗压强度与隧洞垂向应力比值被作为脆性破坏评价指标;Martin等<sup>[2]</sup>、Kaiser等<sup>[3]</sup>通过统计多个硬岩地下试验洞室片帮案例,分析了围岩片帮的应力条件,并建立了片帮深度与应力水平及围岩强度之间的关系;Read<sup>[4]</sup>通过对AECL硬岩地下试验洞片帮分布的统计,确定了片帮位置与应力分布之间的关系。随着我国西南地区水电工程的开展,一大批地下洞室群开建,极大地促进了针对片帮问题的分析研究。曾冬霞<sup>[5]</sup>对松塔水电站坝区平硐片帮现象进行了编录,并结合应力分布特征模拟了松塔水电站片帮形成机制;张宜虎等<sup>[6]</sup>结合工程需要,建立了片帮分级依据,深入研究片帮上拉裂纹的成因,并以此推导出地应力方向;黄润秋等<sup>[7]</sup>对锦屏I级水电站的破坏特征进行了详细的归类,并详细地分析了片帮等破坏的特征及其机理;侯哲生等<sup>[8]</sup>通过现场勘查,将锦屏二级水电站大理岩破坏分为拉张型板裂化岩爆、拉张型板裂化片帮、剪切型岩爆、剪切型片帮四大类;针对白鹤滩水电站片帮问题,刘国锋等<sup>[9]</sup>作了详细的分析,并归纳了其片帮破坏特征、规律及机制;江权<sup>[10]</sup>基于围岩片帮形迹对白鹤滩宏观地应力大小及方向进行了探讨;中国水电顾问集团华东勘测设计研究院<sup>[11]</sup>结合微震监测预报了围岩片帮发生的位置。

总的来说,以上研究是对片帮特征及其发生机理的一个基本概括和归纳,对于片帮特性的研究具

有非常好的借鉴作用,但是针对不同的工程,其围岩破坏特征及其机制不尽相同。本文结合地质资料、开挖记录及其现场勘查,对白鹤滩左岸地下厂房片帮特征进行归纳分析,并结合离散元数值模拟软件分析开挖作用下的应力特征,揭示白鹤滩地下厂房片帮机理。

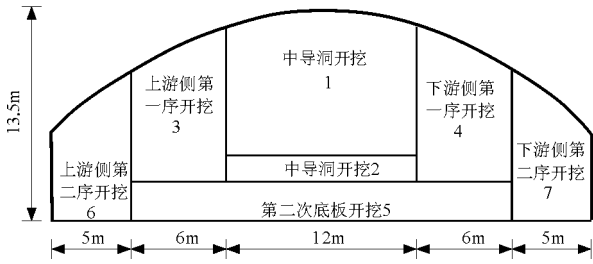
## 2 工程概况

白鹤滩水电站是金沙江下游第二梯级,以发电为主,兼顾航运防洪等综合效益。坝顶高程834 m,最大坝高289 m,坝顶中心线弧长703.2 m。枢纽主体工程包括引水发电、大坝、泄洪消能等建筑物,是世界上在建的第二大水电站。

白鹤滩左岸地下厂房布置在拱坝上游山体内,地表为倾向右岸偏上游的斜坡。地下厂房洞室水平埋深800~1050 m,垂直埋深260~330 m,由主副厂房洞、主变洞、尾水管检修闸门室、尾调室4大洞室组成,4大洞室平行布置,洞室轴线方向为N20°E。主副厂房洞室长438 m,高86.7 m,跨度为31 m(岩梁以上宽34 m)。厂房顶拱高程624.60 m,尾水管底板高程537.9 m。主要为单斜岩层岩层总体产状为N42°~45°E,SE∠15°~20°。主要由P<sub>2</sub>β<sub>23</sub>、P<sub>2</sub>β<sub>31</sub>及P<sub>2</sub>β<sub>32</sub>层新鲜状隐晶质玄武岩、斜斑玄武岩、杏仁状玄武岩、角砾熔岩等组成,岩质坚硬。厂区发育原生构造和断裂构造,根据平硐揭露,共有17条断层,其共同特征是走向总体上在N40°~70°之间,具有75°以上的陡倾角,性质以平移或走滑为主。其中以f717、f721、f723及f726等规模相对较大。层间错动带C<sub>2</sub>沿P<sub>2</sub>β<sub>24</sub>层凝灰岩中部发育,产状为N42°~45°E,SE∠14°~17°,另外主厂房上游大量裂隙发育。应力以构造应力为主,水平应力明显大于垂直应力。第一和第二主应力基本水平,第三主应力大致垂直。第一主应力方向为NNE向,一般在N0°~20°E之间,倾角2°~11°,量值约在22~26 MPa;第二主应力量值在14~18 MPa;第三主应力近垂直,量值相当于上覆岩体自重,一般为13~16 MPa。

## 3 厂房破坏特征

白鹤滩地下厂房尺寸巨大,第一层采用先开挖中导洞,再扩挖两侧的方案,其具体开挖步序如图1所示,截至2015年3月,第一层基本施工完毕。左岸地下厂房采用光面爆破,顶拱成形良好。开挖完成后,围岩陆续出现各种破坏现象,具体可归结为如下几类:



注:开挖步序为:1→2→3→4→5→6→7

图1 左岸地下厂房第一层断面开挖步序示意图

### 3.1 片帮剥落

在开挖完成后数小时内,顶拱部分陆续出现不同程度的片帮、剥落,如图2所示。主厂房、主变室以及尾水管道均有分布,主要分布在主厂房顶拱、上游拱肩及拱座,厚度介于3~10 cm之间,少数大于10 cm,其中小于3 cm的主要为片状;大于3 cm的

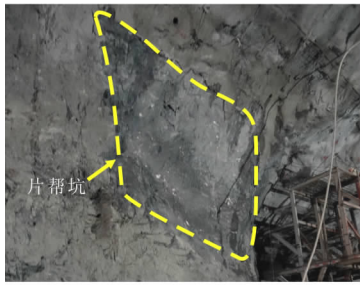


图2 6#机组段上游片帮

### 3.3 顶拱裂隙开裂

除开挖过程出现片帮、外鼓,顶拱在第一层开挖完毕后还陆续出现大量裂隙。经现场勘探,主厂房区域出现12条裂缝,绝大部分出现在上游部位,与片帮发育位置基本一致,其规模不等。出露部位粗糙、不规则并存在大量混凝土掉块现象,其走向基本沿着N40°E~N70°,倾向上游,如图4(a)所示。此外在裂隙周围往往伴有水渗漏,并伴随大量的钙类物质析出,如图4(b)所示,这说明这些裂隙深度较大,与地勘报告结论一致。

## 4 围岩破坏机理分析

结合白鹤滩左岸地下厂房破坏特征与地勘资料发现围岩破坏分布与裂隙分布特征具有高度一致性,这说明地质缺陷可能是主厂房开挖破坏的内在原因。为此,采用离散元程序 UDEC 分别建立宏观及微观模型,以探寻地质缺陷给主厂房开挖带来的具体影响。

### 4.1 数值模拟

4.1.1 模型的建立 为分析主厂房顶拱裂隙,选取一

为板状,随着支护工作的进行,片帮现象逐渐减少,但仍然不时发生。

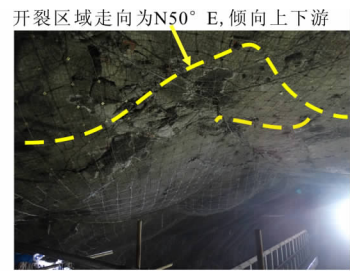
图3为发生于6#机组上游K15+190顶拱第一层开挖期间的片帮现象,该处岩体完整,无渗水,图3显示,片帮坑呈浅坑状,脱落分离岩体大致呈现片状。

### 3.2 围岩外鼓

在顶拱开挖结束后,发现整个顶拱上游不少部位出现外鼓现象,呈驼峰状,规模不等,半径1~10 m均有,突出部分最大变形值高达1 m,主要分布于主厂房上游顶拱至拱座部位。部分边缘与混凝土交界处无裂缝,如图3(a)所示;部分外鼓严重,随着时间的推移,鼓出部分混凝土开裂岩体外凸,并且其中中心混凝土开裂线走向约为N50°E,倾向上游,与主厂房大部分裂隙走向一致,其中4#机组顶拱如图3(b)所示。



(a) 4#机组顶拱内鼓



(b) 副安装厂房围岩开裂内鼓

图3 主厂房顶拱内鼓破坏

典型剖面进行二维数值模拟计算,该剖面地质图如图6所示。由于几大岩层岩石力学参数差别较小,便统一按照弱风化隐晶质玄武岩取值,裂隙按照LS3152取值,岩体参数及裂隙强度参数见表1、表2。

表1 不同岩体力学参数

| 岩体类型 | 密度/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 弹性模量/<br>GPa | 泊松比  | 抗剪断强度    |               |
|------|------------------------------|--------------|------|----------|---------------|
|      |                              |              |      | <i>f</i> | <i>C</i> /MPa |
| Ⅲ类   | 27                           | 15           | 0.26 | 1.0      | 1.0           |

表2 主要结构面力学参数

| 结构面       | 总厚度/<br>cm | 综合模<br>量 <i>E</i> /GPa | 抗剪断强度    |               |
|-----------|------------|------------------------|----------|---------------|
|           |            |                        | <i>f</i> | <i>C</i> /MPa |
| C2 错动带    | 60         | 0.12                   | 0.25     | 0.04          |
| LS3152 裂隙 | 3.5        | 0.30                   | 0.50     | 0.10          |

模型图如图5,X轴沿水流方向,Y轴沿竖直方向,模型尺寸为350 m(水流方向)×350 m(竖直方向),包含块体18个,节点5 026个,网格9 321个。其中岩体采用Mohr-Coulomb本构模型,错动带及裂隙采用Joint area contact-coulomb slip本构模型。

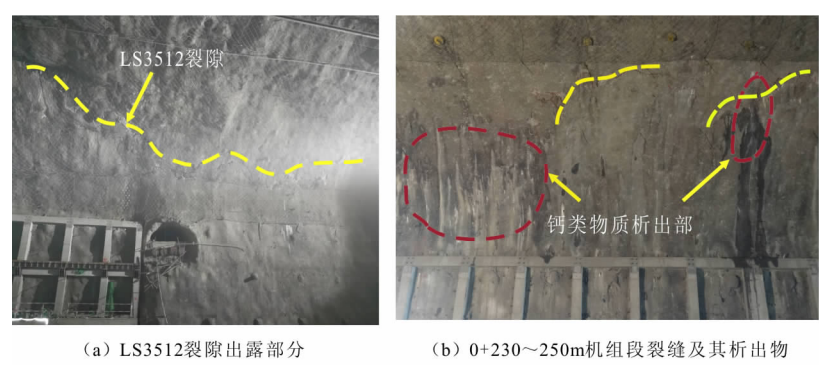


图 4 主厂房上游拱肩裂缝

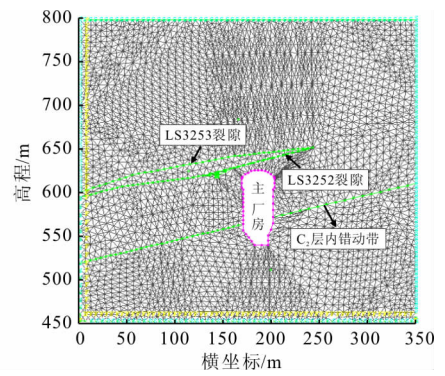


图 5 左岸地下厂房模型

4.1.2 计算结果分析 通过计算得到初始应力分布如图 6 所示,厂区初始应力场与地勘报告给出的基本一致。

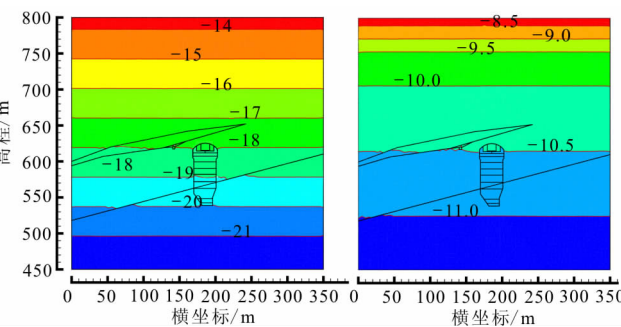


图 6 左岸地下厂房初始应力场(单位:MPa)

图 7 为主厂房第一层开挖期间的主应力分布

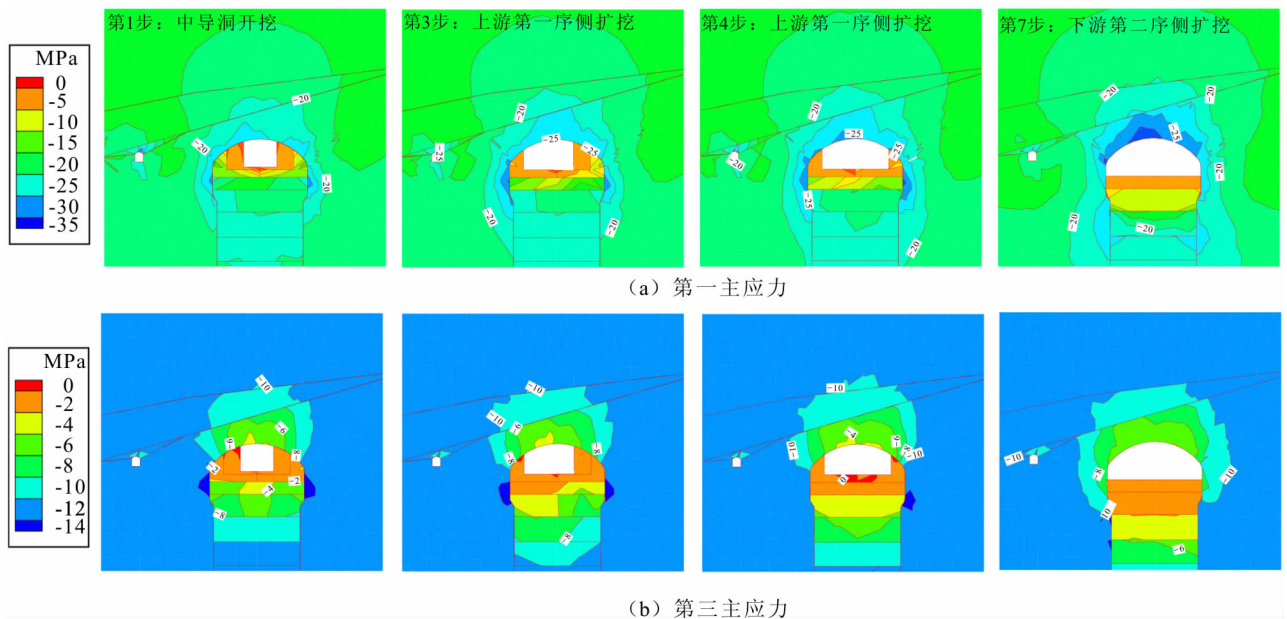


图 7 开挖过程中主应力分布图

4.2 片帮机制分析

白鹤滩地下厂房围岩破坏区域主要发生在上游侧,极少部分发生在下游侧。这与应力场分布有极大关系,由图 7 可以看出,片帮集中区域多出现第一

图,随着开挖的进行,应力不断进行自我调整。由图 7(a)可以看出,开挖区域边墙及地板第一主应力降低;整体上顶拱拱弧线周围第一主应力集中,随着开挖的进行,第一主应力调整区随着开挖区域的扩大向四周扩展,主要表现为顶拱应力集中区域不断扩大,其最大值不断增大,最大应力出现在顶拱偏上游位置,最大值达到 30MPa。由图 7(b)得知,中导洞开挖之时,其上游第三主应力显著降低,甚至出现负值;在整个区域第三主应力都出现卸荷状态,并且卸荷程度由开挖区域向外逐渐降低,其顶拱部分卸荷最为严重。整体上,第一主应力集中区域出现在主厂房顶拱偏上游区域;而第三主应力最小值也集中分布于上游区域。这与片帮分布基本一致。

主应力集中而第三主应力卸荷的状态,例如在第三步上游第二序开挖时,上游开挖面与顶拱相接的地方,第一主应力集中,高达 25 MPa;第三主应力降低,甚至于出现拉应力。室内获取各类玄武岩单轴

抗压强度  $\sigma_c$  介于 75 ~ 199 之间,其部分区域( $\sigma_1 - \sigma_3$ )/ $\sigma_c \geq 0.33$ 。Martin 等<sup>[2]</sup>通过对深部结晶岩体的片帮破坏特征研究发现,当某一开挖截面内的最大切向边界应力与岩块单轴抗压强度的比值  $\theta_{\max}/\sigma_c \geq 0.4 \pm 0.1$  时,开挖面上会出现应力诱发的脆性破坏。可见主厂房第一层开挖期间,由于应力调整,使得顶拱区域出现应力集中,超过岩体承受能力,进而发生片帮行为。

经过现场勘探与查阅地勘报告发现,主厂房顶拱破坏的位置往往存在地质缺陷,特别是长大裂隙,如 LS3152、LS3253、LS3253 多个长大裂隙。主厂房原本第一主应力方向为 N30° ~ 50°,倾角 5° ~ 13°,其方向与主厂房轴线连线基本一致,但是受开挖作用影响,应力调整,临近主厂房位置最大应力与主厂房横截面垂直,并不断聚集,而长大裂隙附近围岩承载力较低,导致岩体弯折外鼓以及塌落等破坏,出现钙类物质析出及渗水现象,图 8 即为二次应力分布与裂隙共同导致的主厂房钢筋外露变形。另一方面,由于围岩软弱区域岩体较弱,围岩外力将转移至上游其他区域,导致主厂房顶拱外鼓以及片帮等破坏,如图 3(a)所示。由于裂隙主要分布于主厂房上游,主厂房上游成型明显劣于主厂房下游部位。



图 8 主厂房上游侧桩号 0+50 m 附近钢筋外露变形

## 5 结 论

通过现场勘探和对地质报告及现场资料的分析,对白鹤滩水电站地下厂房围岩片帮破坏种类进行了简单的归纳,并结合数值模拟对其机理进行分析,得出如下一些结论:

(1) 主厂房顶拱围岩破坏类型可分为片帮剥落、围岩外鼓以及裂隙开裂 3 种类型,并且存在渗漏、异类物质析出两种现象。

(2) 数值模拟结果表明,围岩破坏与白鹤滩中高应力状态具有密切关系。开挖作用导致应力二次分布,其最大应力  $\sigma_1$  与主厂房区域岩石单体抗压强

度  $\sigma_c$  比值达到围岩片帮破坏临界值 0.33,最终使得围岩发生片帮破坏。

(3) 主厂房围岩长大裂隙力学参数低,承载能力弱,在开挖作用下出现多种破坏形式,如围岩外鼓、裂隙开裂、渗水、钙类物质析出等,并导致其临近区域应力过度集中,应力异常增大,最终使围岩发生片帮破坏。长大裂隙主要分布于主厂房上游,导致主厂房上游顶拱、边墙等部位成型远差于下游,并且其破坏现象随着开挖的进行持续发展,因此,在后期开挖期间当对此密切关注。

## 参考文献:

- [1] Hoek E, Brown E T. Underground excavation in rock[M]. London: Inst. Mining and Metallurgy, 1980: 218 - 222.
- [2] Martin C D, Christiansson R. Estimating the potential for spalling around a deep nuclear waste repository in crystalline rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(2): 219 - 228.
- [3] Kaiser P K, McCreath D R, Tannant D D. Canadian support handbook[M]. Sudbury, Canada: Geomechanics Research Centre, Laurentian University, 1996: 314.
- [4] Read R S. 20 years of excavation response studies at AECL's underground research laboratory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1251 - 1275.
- [5] 曾冬霞. 西藏怒江松塔水电站坝区岩饼及片帮形成机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- [6] 张宜虎, 卢轶然, 周火明, 等. 围岩破坏特征与地应力方向关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(s2): 3526 - 3535.
- [7] 黄润秋, 黄达, 段绍辉, 等. 锦屏 I 级水电站地下厂房施工期围岩变形开裂特征及地质力学机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 23 - 35.
- [8] 侯哲生, 龚秋明, 孙卓恒. 锦屏二级水电站深埋完整大理岩基本破坏方式及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 727 - 732.
- [9] 刘国锋, 冯夏庭, 江权, 等. 白鹤滩大型地下厂房开挖围岩片帮破坏特征、规律及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 36(5): 865 - 878.
- [10] 江权, 冯夏庭, 徐鼎平, 等. 基于围岩片帮形迹的宏观地应力估计方法探讨[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 1452 - 1459.
- [11] 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. 金沙江白鹤滩水电站左岸引水发电系统土建及金属结构安装工程招标文件参考资料: 工程地质[R]. 杭州: 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 2013.
- [12] 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. 金沙江白鹤滩水电站可行性研究报告[R]. 杭州: 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 2013.