

# 阜平抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定分析研究

陈天城<sup>1</sup> 王强<sup>2</sup> 王健楠<sup>1</sup> 康天宇<sup>1</sup>

1 深能阜平蓄能发电有限公司 2 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司

DOI:10.12238/hwr.v8i10.5768

**[摘要]** 复杂地质条件下,断层等软弱地质结构面是影响抽水蓄能电站地下洞室群围岩稳定的主要因素。以河北阜平抽水蓄能电站地下厂房为例,通过计算地下洞室群围岩变形、洞周应力和塑性区范围,判断洞室群布置的合理性以及主要洞室整体稳定性。论证主要洞室开挖步骤和支护参数的合理性,提出断层等特殊部位的支护建议。

**[关键词]** 岩脉; 断层; 围岩稳定性; 地下洞室群; 开挖支护

**中图分类号:** TU94+1 **文献标识码:** A

## Research on the Stability Analysis of Surrounding Rock in the Underground Powerhouse of Fuping Pumped Storage Power Station

Tiancheng Chen<sup>1</sup> Qiang Wang<sup>2</sup> Jiannan Wang<sup>3</sup> Tianyu Kang<sup>1</sup>

1 Shenneng Fuping Energy Storage Power Generation Co., Ltd. Fuping County, Baoding City

2 China Power Construction Corporation Beijing Survey and Design Institute Co., Ltd

**[Abstract]** Under complex geological conditions, weak geological structural planes such as faults are the main factors controlling the stability of the surrounding rock of underground caverns in pumped storage power stations. Taking the underground powerhouse of the Fuping Pumped Storage Power Station in Hebei Province as an example, the rationality of the layout of the underground cavern group and the overall stability of the main cavern are determined by calculating the deformation of the surrounding rock, the stress around the cavern, and the plastic zone range. Demonstrate the rationality of the excavation sequence and support parameters for the main caverns, and propose support suggestions for special areas such as faults.

**[Key words]** rock veins; Fault; Rock stability; Underground cavern group; Excavation support

### 1 概述

阜平抽水蓄能电站地下厂房区域地质条件较复杂,厂房周边分布有灰绿岩脉及较大规模断层,施工条件复杂;地下厂房洞室群规模大,洞室密集,厂房主要洞室边墙高、跨度大,地下厂房洞室群的施工开挖顺序和围岩支护参数等都将直接影响地下厂房洞室群的围岩稳定、工程投资和电站的安全运行。本文结合河北阜平抽水蓄能电站地下厂房洞室群围岩稳定分析的实例,为类似工程的设计和计算提供参考。

### 2 工程概况

阜平抽水蓄能电站位于河北省保定市阜平县砂窝乡境内。工程为大(1)型一等工程,规划装机容量1200MW。枢纽工程主要建筑物由上水库、输水系统、地下厂房及开关站、下水库、补水系统等部分组成。

地下厂房位于输水系统的中部,厂区建筑物主要由地下厂房、主变洞、母线洞、出线洞、排风平洞及排风竖井、交通洞、通风兼安全洞、排水廊道、地面开关站等组成。

地下厂房由主机间、安装场和主厂房组成,呈“一”字形布置。总开挖尺寸为176m×26.1m×55.5m(长×宽×高,下同)。安装场布置在主机间左端,副厂房布置在主机间右端。主机间开挖尺寸为109m×26.1m×55.5m,安装场开挖尺寸为47m×26.1m×55.5m,副厂房开挖尺寸为20.0m×26.1m×55.5m。主机间内安装4台300MW竖轴单级混流可逆式水泵水轮机组,机组安装高程为333.0m。主厂房顶拱开挖高程为374.5m,底板开挖高程为319.0m。主机间分五层布置,分别是发电机层、母线层、水轮机层、蜗壳层和尾水管层。主厂房采用锚喷支护型式和岩壁吊车梁结构。

### 3 计算模型

根据引水发电系统洞室群的位置及布置型式、断面尺寸,模拟阜平抽水蓄能电站地下厂房洞室群实际结构和厂区实际地形及地质条件,建立三维有限元计算模型,包括主厂房洞、主变洞、尾水事故闸门室、4条母线洞、4条尾水洞、4条引水洞及岔管、出线支洞、出线洞、交通洞、通风洞等主要洞室,以及对厂

房区围岩稳定影响较大的断层进行模拟,地下洞室群及断层模型位置图详见下图3-1及图3-2。

地下洞室稳定数值分析主要应用三维有限元计算程序,对地下洞室的开挖、支护和周围岩体的地质构造、地应力场等进行模拟,包括围岩稳定分析、岩壁吊车梁锚固计算,为可行性研究阶段地下厂房洞室群的布置及支护设计提供可靠的依据。

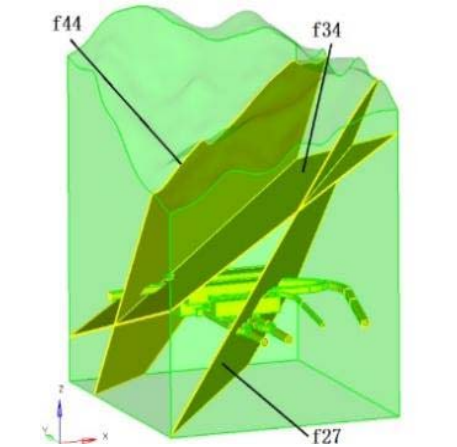


图 3-1 地下洞室厂房区与断层相对位置图

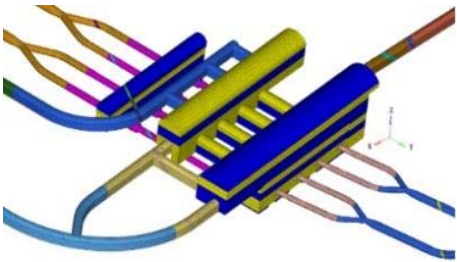


图 3-2阜平地下厂房区开挖部分有限元网格模型

4 地下洞室群开挖施工步骤

4.1主厂房

表4-1 主厂房开挖分层表

| 厂房分层   | 起止高程(m)     | 开挖高度(m) | 出渣通道                 |
|--------|-------------|---------|----------------------|
| I层(顶拱) | 374.5~367.5 | 7       | 通风兼安全洞               |
| II层    | 367.5~360.5 | 7       |                      |
| III层   | 360.5~349.0 | 11.5    | 交通洞                  |
| IV层    | 349.0~342.5 | 6.5     |                      |
| V层     | 342.5~336.5 | 6       | 厂房下部施工支洞、引水系统下支洞和交通洞 |
| VI层    | 336.5~328.0 | 8.5     |                      |
| VII层   | 328.0~319.0 | 9       | 尾水隧洞、尾水隧洞施工          |

主厂房开挖尺寸为176m×26.1m×55.5m(长×宽×高),拟分七层开挖,从上到下依次布置4层施工通道,分别为通风洞、交通洞、厂房下部施工支洞、尾水隧洞施工支洞。

主副厂房从上而下共分七层开挖,并分别采用不同高程的施工支洞出渣。地下厂房开挖分层见表4-1。

4.2主变室、尾闸室、尾调室

主变室、尾闸室、尾调室开挖分顶拱及下部两部分,施工通道为通风洞、尾闸交通洞、尾调交通洞和交通洞,其施工方法与主副厂房基本相同。尾闸室、尾调室下部闸门井采用正井法开挖溜渣导井,正井法分层扩挖至设计断面,石渣由尾水隧洞施工支洞1经交通洞运输。主变室开挖分层见表4-2。

表4-2 主变室开挖分层表

| 开挖分层   | 起止高程(m)      | 开挖高度(m) | 出渣通道   |
|--------|--------------|---------|--------|
| I层(顶拱) | 372.5~363.75 | 8.75    | 通风兼安全洞 |
| II层    | 363.75~356.6 | 7.15    |        |
| III层   | 356.6~349.0  | 7.6     | 交通洞    |

主变室分层开挖施工可考虑与主厂房同高程开挖同步进行。地下厂房、主变洞开挖分层见图4-1。

5 地下洞室群开挖设计支护方案

阜平地下洞室群均采用喷锚支护,支护方案及参数见表5-1。

表5-1 地下洞室支护参数表

| 位置   |       | 支护参数                                                                                                                                                                 |      |           |
|------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------|
|      |       | 锚杆                                                                                                                                                                   | 喷混凝土 | 挂钢筋网      |
| 地下厂房 | 顶拱边墙  | C28@1.5×1.5m, L=6m/9m间隔布置。<br>系统锚索:顶拱5排、L=25m, P=1600KN,上游边墙, L=20m, P=1600KN,间距为6m(6排,其中2排与上层、中层排水廊道对穿);下游边墙, L=20m/40m, P=1600KN,间距为6m(5排,其中1排与主变洞对穿,1排与上层排水廊道对穿)。 | 20cm | 8@20×20cm |
|      | 岩壁吊车梁 | 上部锚杆(2排): C36mm, L=10m, @. 75m;<br>下部锚杆(1排): C28mm, L=8m, @. 75m。                                                                                                    |      |           |
| 主变洞  |       | C28@1.5×1.5m, L=5m/7m间隔布置。<br>系统锚索:上下游边墙各2排, L=20m/40m, P=1600KN,间距为6m。                                                                                              | 20cm | 8@20×20cm |
| 尾闸洞  |       | 锚杆 C 25/C28, L=5/7m,间隔布置。<br>IV、V类围岩段设随机锚索 L=20m, T=1000KN、工字钢 I 20a 间距 0.75m、喷射纤维混凝土 C30 厚 20cm 加强支护                                                                | 15cm | 8@20×20cm |

6 地下厂房围岩稳定计算分析

6.1变形特征

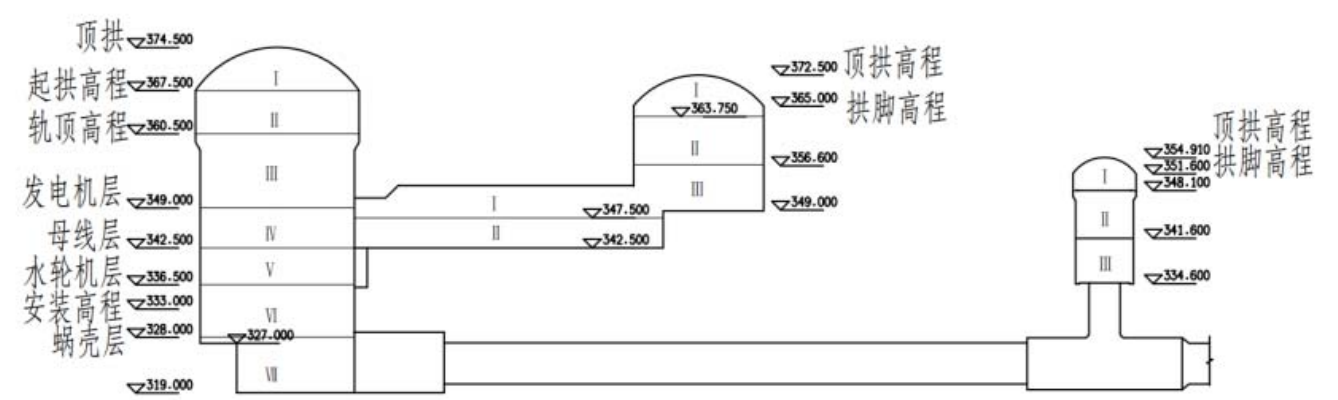
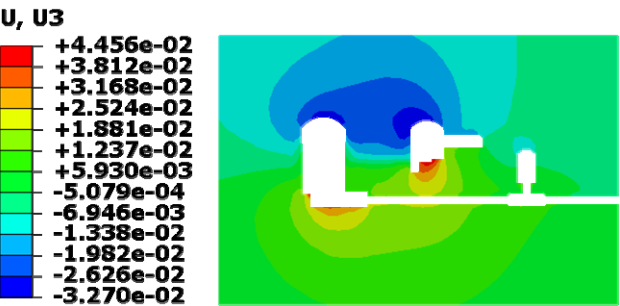
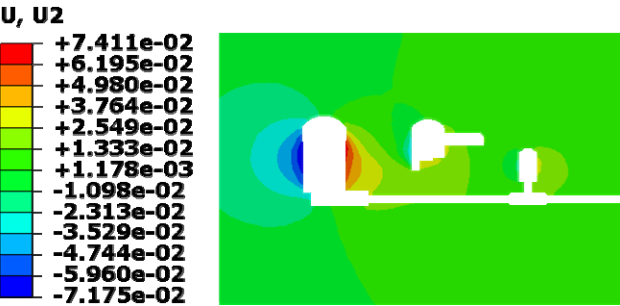
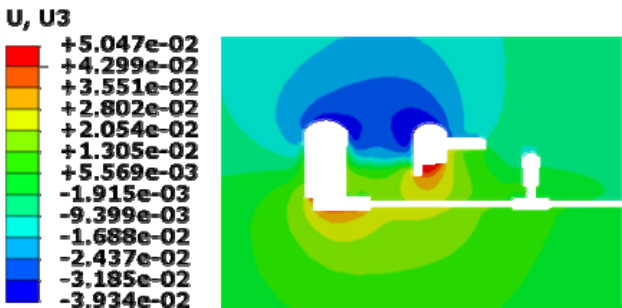
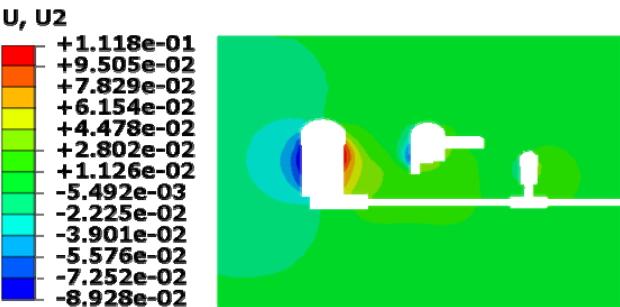


图 4-1 三大洞室开挖分级示意图

图6-1给出了有、无支护工况下2#机组段开挖结束时位移等值线云图,从图6-1和表6-1可以看出,支护方案下围岩的变形分布规律与无支护工况基本相似,在进行喷锚支护后,洞室围岩的整体位移减小。2#机组断面主厂房顶拱铅直向位移减小16.25%。



设计支护工况



无支护工况

图6-1 工况1、工况2, 2#机组位移等值线云图(U2为水平向, U3为铅直向) (m)

表6-1 设计支护工况与无支护工况主厂房洞周关键点法向位移比较表(mm)

| 断面         | 工况 | 顶拱     | 上游墙、高程(m) |        |        |        | 下游墙、高程(m) |       |       |       |
|------------|----|--------|-----------|--------|--------|--------|-----------|-------|-------|-------|
|            |    | 374.5  | 364       | 357    | 345    | 333    | 364       | 357   | 345   | 333   |
| 厂左0+000.00 | 1  | -35.77 | -40.97    | -74.33 | -79.73 | -66.7  | 45.63     | 94.31 | 97.35 | 72.91 |
|            | 2  | -29.09 | -38.19    | -61.85 | -65.9  | -55.89 | 33.29     | 66.89 | 63.39 | 53.71 |
| 厂左0+025.50 | 1  | -35.75 | -45.52    | -79.99 | -83.79 | -60    | 41.2      | 97.66 | 96.38 | 64.49 |
|            | 2  | -29.94 | -41.21    | -65.01 | -69.51 | -51.53 | 30.41     | 68.14 | 62.31 | 50.88 |
| 厂左0+051.00 | 1  | -36.22 | -45.46    | -78.63 | -80.9  | -64.2  | 38.62     | 96.98 | 92.8  | 63.88 |
|            | 2  | -30.42 | -40.99    | -64.72 | -67.06 | -54.32 | 29.55     | 67.63 | 60.71 | 49.53 |
| 厂左0+076.50 | 1  | -34.84 | -44.21    | -72.52 | -72.58 | -53.17 | 33.99     | 85.62 | 80.43 | 60.26 |
|            | 2  | -29.69 | -39.98    | -59.25 | -60.75 | -45.42 | 26.27     | 60.02 | 52.91 | 45.07 |

注：顶拱位移向上为正,侧墙位移指向下游为正。

设计支护工况下, 洞室开挖支护完成后, 主厂房顶拱最大铅直位移为31.69mm, 发生在主厂房中部, 小于无支护工况下的43.70mm; 上游墙沿水流方向最大位移为71.75mm, 发生在上游墙中部, 小于无支护工况下的89.53mm; 下游墙最大位移为75.33mm, 发生在1#、2#母线洞之间的边墙中部, 小于无支护工况下的113.58mm。变形量与全国范围内的抽水蓄能电站地下厂房相比属于正常范围。

#### 6.2 塑性区特征

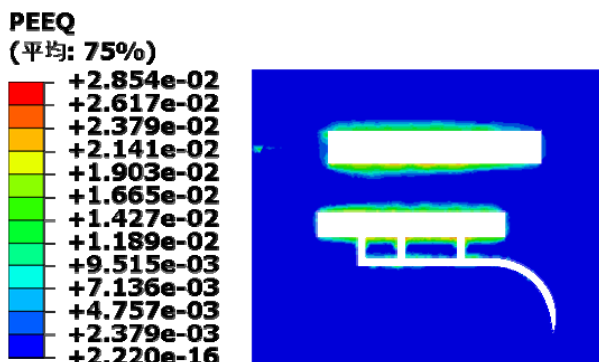


图6-2 主厂房360.5m(轨顶)高程水平剖面塑性区分布示意图

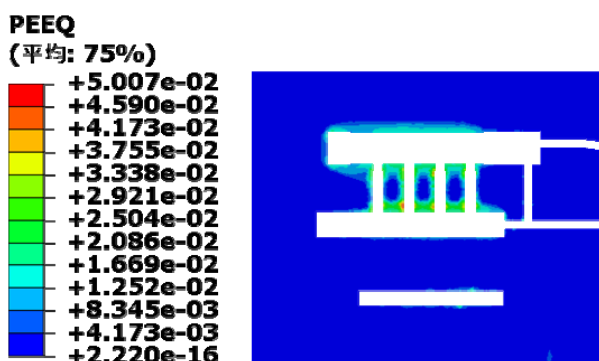


图6-3 主厂房349.0m(发电机层)高程水平剖面塑性区分布示意图

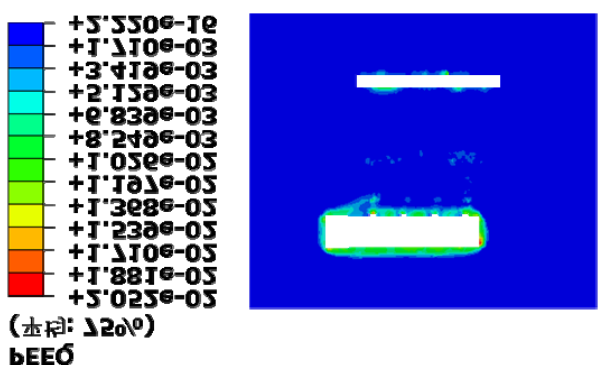


图6-4 336.5m(水轮机层)高程水平剖面塑性区分布示意图

图6-2~图6-4分别给出了360.5m(轨顶)、349.0m(发电机

层)、336.5m(水轮机层)3个高程水平剖面塑性区分布示意图。其中349.0m发电机层塑性区相对较大。设计支护下, 发电机层主厂房上游墙塑性区平均深度约为4.28m, 下游墙塑性区平均深度约为8.12m, 且主厂房最大锚杆长度为9m, 塑性区在锚杆支护范围内; 4#母线洞左侧的塑性区平均深度1.48m, 右侧的塑性区平均深度2.28m, 且母线洞最大锚杆长度为3m, 塑性区在锚杆支护范围内; 主变洞上游墙塑性区最大深度6.38m, 下游墙塑性区平均深度1.96m, 主变洞最大锚杆长度为7m。综上, 主厂房、主变洞、尾闸洞三大洞室系统锚杆长度均超过了塑性区深度。

#### 6.3 应力特征

根据现场实测地应力结果和厂区地质资料反演出阜平抽水蓄能电站地应力场, 主厂房的第三主应力在-10.89~-12.73MPa之间, 大部分区域的地应力在-11.80MPa左右, 较小的压应力(-10.70MPa)发生在主厂房安装间顶拱与岩体交界处, 最大压应力位置在主厂房1#机组尾水支管底部; 第一主应力在-8.44~-10.22MPa之间, 最小压应力位置在主厂房安装间顶拱与岩体交界处。厂房洞室的洞室围岩以III类弱风化黑云斜长片麻岩、黑云钾长片麻岩、辉绿岩为主, 结构面中等发育, 缓倾角裂隙较发育, 岩体较完整单轴饱和抗压强度为30~55MPa。主变室的第三主应力在-10.80~-11.93MPa之间, 最大压应力位置在主变室底部事故集油池与围岩接触位置; 第一主应力在-8.33~-9.60MPa之间, 最小压应力位置在主变洞端部顶拱处。尾闸室的第三主应力在-10.70~-11.97MPa之间, 最大压应力位置在尾闸室底部与端墙拐角连接处; 第一主应力在-7.96~-9.69MPa之间, 最小压应力位置在尾闸室顶拱与断层fp 27交界处。

#### 6.4 锚杆应力分析

设计支护工况下, 洞室开挖支护完成后, 主厂房顶拱最大铅直位移为31.69mm, 发生在主厂房中部, 小于无支护工况下的43.70mm; 上游墙沿水流方向最大位移为71.75mm, 发生在上游墙中部, 小于无支护工况下的89.53mm; 下游墙最大位移为75.33mm, 发生在1#、2#母线洞之间的边墙中部, 小于无支护工况下的113.58mm。设计支护工况与无支护工况相比, 洞周应力分布规律基本相同, 应力量值变化小于位移变化量。主厂房最大主拉应力为0.93MPa、最大主压应力为-36.78MPa, 均未超过岩石饱和抗拉、抗压强度。塑性区分布范围有一定减小, 支护具有一定效果, 主厂房下游墙母线洞附近塑性区深度较大, 建议加强交叉洞口的支护。主厂房最大锚杆拉应力为256.94MPa, 发生在第7级开挖结束主厂房下游墙一侧3#机组段; 主厂房最大预应力锚索拉应力为1236.88MPa, 出现在第7级开挖结束下游墙一侧2#机组段。总体来说, 阜平抽水蓄能电站支护方案满足要求。

#### 7 结语

根据上述三维数值计算分析结果看, 阜平抽水蓄能电站设计支护方案能够满足厂房稳定安全要求。同时, 经分析主要计算结论, 为阜平抽水蓄能电站地下厂房洞室群的稳定支护方案和参数提供了支撑依据, 对岩脉及断层外露部位局部采取随机支护措施解决。

**[参考文献]**

[1]邓建,肖明.澜沧江黄登水电站施工期地下洞室群围岩稳定评价及支护形式深化研究[R].武汉大学,2016.

[2]林春兰,杨世界.大型地下洞室群围岩稳定及支护措施深化研究专题总结报告[R].中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司,2016.

[3]刘亚军,陈云长.抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定评价与有关问题探讨[J].广东水利水电,2006,(S1):20-22.

[4]杨为民,李晓静,陈卫忠.琅琊山抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定性分析[J].山东交通学院学报,2004,(1):14-17.

[5]张练,丁秀丽,付敬.惠州抽水蓄能电站地下厂房洞室围

岩稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2003,(S1):2206-2209.

[6]甘孝清,谭勇,李端有.白莲河抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定性研究[J].长江科学院院报,2012,29(9):107-110.

[7]桂惠中,王涛.地下洞室围岩稳定计算分析[J].建筑技术开发,2005,32(5):3.

[8]肖明,地下洞室施工开挖三维动态过程数值模拟分析.岩土工程学报,2012,22(4):421-425.

**作者简介:**

陈天城(1966--),男,汉族,福建省福州市人,博士研究生,高级工程师,研究方向:水工结构。