

# 水压致裂法在地下厂房长轴线布置中的应用

韩任清 韦敏鹏 李雪红 肖力君

中国能源建设集团广西电力设计研究院有限公司，南宁市，530013；

**摘要：**本文探讨了水压致裂法在地下厂房轴线布置中的应用。通过介绍水压致裂法的原理与方法，结合具体工程案例，分析其在地下厂房轴线布置中的重要作用。该方法通过在钻孔中注入高压水，导致钻孔围岩产生纵向裂隙，根据注水致裂过程中的水压力值和原岩应力之间的关系，可以确定地应力的大小和方向。水压致裂法作为一种有效的地应力测试手段，为地下厂房轴线布置提供了科学依据，确保了工程的安全性和稳定性。

**关键词：**水压致裂法；地应力测试；地下厂房；长轴线布置

**DOI：**10.69979/3060-8767.24.3.010

## 引言

地下厂房轴线布置是地下工程中的重要内容，其合理与否直接关系到工程的安全性和稳定性。地应力作为影响地下厂房稳定性的关键因素之一，需要通过科学的方法进行测试和分析。水压致裂法作为一种先进的地应力测试方法，在地下厂房轴线布置中发挥着重要作用。

## 1 水压致裂法原理与方法

水压致裂法是在需要测试的地下工程顶部先进行地质钻孔，然后在钻好的地质钻孔中进行加压注水，所加压力根据地下工程运行中可能受到的最大压力按规范的安全系数进行施加。高压水的注水导致钻孔围岩产生一组通过钻孔轴线的纵向裂隙，根据加压注水导致孔壁出现裂缝的过程中，过程中对施加的水压力值和试验地质钻孔孔壁应力之间的关系，通过计算确定试验段孔壁水平地应力的大小和方向。这种采用高压水压裂试验段岩壁的方法是根据弹性力学作为理论计算基础，把地质钻孔试验段孔壁岩体近似为线弹性以及各向同性的实验体，试验段岩体是完整的（所以试验选点应尽量选岩体完整部位），并将采用高压压水试验段的孔壁岩体近似看做非渗透性的。

## 2 水压致裂法在地下厂房轴线布置中的应用

### 2.1 地应力测试

在地下工程建设中，首先需要地质条件进行详细勘察，其中地应力测试是必不可少的一环。通过水压致裂法，可以准确地测量出地下厂房所在区域的地应力大小和方向，为后

续的轴线布置提供数据支持。

### 2.2 地下厂房轴线布置原则

在蓄能电站地下厂房设计的时候，其长轴线布置一般应考虑以下几点：①首先是地下空间长纵轴线要其周围岩体的主要节理或裂隙的延伸方向形成较大角度的交角，预防上游和下边墙受到过大的侧向压力。②在顾及第①个原则的基础上地下厂房长轴线在布置的时候应尽量与初始地应力的最大主应力的方向平行或与最大主应力方向成较小的交角，以便减少后期厂房开挖因为应力释放造成的岩体稳定性问题。

### 2.3 工程案例

#### 2.3.1 案例概况

以某蓄能电站地下厂房为例，工程区附近的地面高程130m~900m，总体属低山丘陵地貌。根据厂房区内钻孔SK33，孔深438m，孔口高程478.54m，水位距孔口约23m。岩性主要为：0m~4.3m揭露为黏性土；4.3m~19.5m揭露为全风化花岗岩；19.5m~21.7m为强风化花岗岩，岩芯呈破碎状且手可折断；21.7m~44.4m揭露为弱风化花岗岩，岩芯较完整且裂隙较发育；44.4m~438.0m揭露为微风化花岗岩，岩芯呈现较完整且裂隙少量发育，57.5m~58.0m及67.0m~69.0m岩芯较破碎。孔深221.0m~235.5m，裂隙密集，沿裂面有2mm~5mm的蚀变现象。

#### 2.3.2 水压致裂法测试数据分析

CFSK33 钻孔水压致裂法试验成果整理见下表3.2，从试验过程中传感器读取的时间压力关系曲线来看，测试曲线呈现的曲线形态复核该种测试方法的一般规律，测试呈现的曲

线各特征拐点清楚。

表 3. 2CFSK33 钻孔试验地应力测试数据整理结果

序号	孔深 /m	Pa /MPa	Pb /MPa	Pc /MPa	Pd /MPa	$\sigma_t$ /MPa	$\sigma_{max}$ /MPa	$\sigma_{min}$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\lambda$	$\alpha_H$ 方位
1	101.3	7.3	4.4	3.3	0.8	2.9	6.7	4.3	2.7	2.5	
2	176.3	12.0	4.4	3.7	1.5	7.6	8.7	5.5	4.7	1.9	N52° W
3	209.2	8.7	5.9	4.2	1.9	2.8	9.0	6.3	5.5	1.6	
4	269.5	9.2	5.9	3.2	2.5	3.3	6.6	5.9	7.1	0.9	
5	299.5	11.3	9.5	7.1	2.8	1.8	15.0	10.1	7.9	1.9	
6	336.2	6.6	6.4	4.8	3.1	0.2	11.6	8.2	8.9	1.3	
7	365.3	10.0	4.1	3.7	3.4	5.9	10.9	7.4	9.7	1.1	
8	377.6	12.4	5.3	5.0	3.5	7.1	13.7	8.8	10.0	1.4	N76° W
9	386.4	8.6	4.9	4.4	3.6	3.7	12.4	8.3	10.2	1.2	
10	393.5	12.4	7.3	5.3	3.7	5.1	12.8	9.2	10.4	1.2	N60° W
11	415.6	11.0	8.3	7.2	3.9	2.7	17.7	11.4	11.0	1.6	
12	426.8	12.5	6.2	5.7	4.0	6.3	15.4	10.0	11.3	1.4	

备注：(1) Pa-首次破裂压力，Pb-破裂裂缝重新张开压力，Pc-裂缝瞬时闭合压力，Pd-试验区域岩石孔隙水压力， $\sigma_t$ -试验区域岩石抗拉强度， $\sigma_{max}$ -试验段最大水平主应力， $\sigma_{min}$ -试验段最小水平主应力， $\sigma_s$ -测点上覆岩土层的自重计算值， $\lambda$ -最大水平主应力方向侧压系数( $\sigma_{max}/\sigma_z$ )。 $\alpha_{max}$ -试验段最大水平主应力方向。  
以上值均为试验地质钻孔在孔口处的压力值无需进行压力损失计算，岩石容重取为 26.5kN/m<sup>3</sup>。

(1) 测试应力量值

根据 CFSK33 钻孔试验数据整理结果显示(表 3.2)，在测试深度为 101.3m~426.8m 区间内，测得该段最大水平主应力范围值为 6.7MPa~17.7MPa，测得该段最小水平主应力范围值为 4.3MPa~11.4MPa，试验点处垂向应力随钻孔深度变化其范围值为 2.7MPa-11.4MPa，实验所得最大水平主应力、最小水平主应力与孔深三者的关系见图 3.3。对试验范围内三者数据进行线性拟合，可推出最大水平主应力与最小水平主应力随试验钻孔孔深(H)变化关系如式(3.1)所示。

$$\begin{cases} \sigma_{max} = 0.0292H + 2.5 \\ \sigma_{min} = 0.0174H + 2.5 \end{cases} \quad (3.1)$$

(2) 应力方位

采用印模器和定位器对试验做形成裂缝进行孔内印模，得出裂缝对应的最大水平主应力方向为 N52° W 至 N76° W，呈 NNW 向。

(3) 侧压系数

经过对测试数据进行处理，试验段最大水平主应力方向侧压系数范围值为 0.9~2.5，在地下厂房区深度区域最大水平主应力方向的侧压系数范围值为 1.1~1.4，最大水平主应力、最小水平主应力和铅直应力三者的大小关系呈  $\sigma_{max} > \sigma_s > \sigma_{min}$  特征，这表明厂房区域的地应力场以水平应力为主导。

2.3.3 水压致裂法测试数据分析

CFSK33 钻孔位于地下厂房区，最大测试深度为 426.8m，测试深度小于地下洞室最大埋深(根据地质剖面估算最大埋深约 570m，位于岔管底部，距测试钻孔水平距离约 300m)。CFSK33 钻孔测试结果具有较好的规律性，反映了厂房区的应力状态，因此根据测试数据可预估整个地下洞室深埋段及测试空白区的围岩应力状态，以便分析洞室围岩应力特征及工程影响。根据地质剖面资料，工程区地下洞室的最大设计埋深约 570m；厂房顶拱至底板的埋深范围约为 320m~400m。根据测试数据进行线性拟合，建议以式(3.1)作为地下洞室不同埋深段围岩的初始主应力分布函数，最大水平主应力方向印模结果的平均值 N63° W 为工程区最大水平主应力的优势方位。

基于上述应力分布函数，可知地下洞室最大埋深处(570m)最大水平主应力量值为 19.1MPa，最小水平主应力量值为 12.4MPa；地下厂房深度区域的最大水平主应力量值测试数据为 11.8MPa~14.2MPa，最小水平主应力量值为 8.1MPa~9.5MPa。以上针对地下洞室围岩地应力场的建议具有一定局限性，可供参考，期待条件成熟时补测深孔进行验证。

在设计阶段地下厂房长轴线的布置方向要考虑整个项目总平的布置合理性以及工程区的地质情况，同时地下厂房深度区域所揭露的初始地应力的大小和方向长轴线的布置也有着至关重要的作用。

类似工程显示，在以水平应力为主的初始应力场中，地

下厂房长轴线在设计布置中应该与揭露的最大水平主应力方向呈平行状态，否则地下厂房的边墙将在应力释放下可能发生严重的变形和破坏。

为了评价地下厂房区域围岩初始应力状态，并推测厂房开挖后岩壁发生变形、岩爆等现象的可能性，需要对计算厂房横截面上的最大切向应力值的大小，图 3.4 表示了开挖之前厂房轴线上岩体的应力状态。

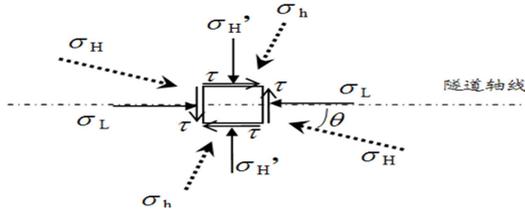


图 3.4 地下厂房长轴线上岩体水平应力示意图

图 3.4 中  $\sigma_H$  和  $\sigma_h$  表示最大水平主应力以及最小水平主应力，来源于测试数据。 $\sigma'_H$  和  $\sigma'_L$  各自表示铅直向和平行地下厂房长轴线的水平应力， $\alpha$  表示  $\sigma'_H$  与  $\sigma_H$  之间形成的夹角， $\theta$  为  $\sigma_H$  方向与厂房轴线方向的夹角。各个应力分量之间的关系计算式见式(3.2)。

$$\begin{aligned} \sigma'_H &= \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) + \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\alpha \\ \sigma'_L &= \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\alpha \\ \tau &= \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \sin 2\theta \end{aligned} \quad (3.2)$$

表 3.3 重点工程部位最大埋深位置的洞室围岩应力分量 (计算值)

纵剖图上位置	埋深 (m)	$\sigma_H$ (MPa)	$\sigma_h$ (MPa)	$\sigma_Z$ (MPa)	$\sigma'_H$ (MPa)	$\sigma'_L$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\sigma_{\theta\max}$ (MPa)
厂房顶拱	320	11.8	8.1	8.5	11.8	8.1	0.2	27.0
厂房底板	400	14.2	9.5	10.6	14.2	9.5	0.3	31.9
隧洞最大埋深	570	19.1	12.4	15.1	13.2	18.4	2.2	32.1

根据岩石试验结果，取洞室围岩花岗岩的饱和单轴抗压强度为 113.5MPa，本报告依据《水力发电工程地质勘查规范》(GB 50287-2016)对厂房区域的应力量级进行评价。

地下厂房埋深约 320~400m， $\sigma_m$  为 11.8~14.2MPa ( $\sigma_m$  为洞室围岩最大主应力，即最大水平主应力  $\sigma_H$ )，按照《水力发电工程地质勘查规范》评价标准，地下厂房范围地应力等级属于中等应力水平；按照强度应力比评价标准， $RC/\sigma_m=9.6\sim 8.0$ ，均大于 7，地应力量级属于低地应力水平。

引水隧洞最大埋深约 570m， $\sigma_m$  为 19.1MPa ( $\sigma_m$  为洞室围岩最大主应力，即最大水平主应力  $\sigma_H$ )，按照《水力发电工程地质勘查规范》评价标准，地下厂房范围地应力等级属

于中等应力水平；按照强度应力比评价标准， $RC/\sigma_m=5.9$ ，处于 4~7 之间，地应力量级属于中等地应力水平。

$$\begin{aligned} (\sigma_\theta)_{\text{顶}} &= 3\sigma'_H - \sigma'_Z \\ (\sigma_\theta)_{\text{边}} &= 3\sigma'_Z - \sigma'_H \end{aligned} \quad (3.3)$$

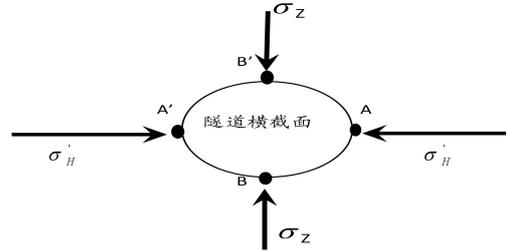


图 3.5 厂房近似横截面轴线应力状态图

其中  $(\sigma_\theta)_{\text{顶}}$ 、 $(\sigma_\theta)_{\text{边}}$  为近似厂房洞顶和边墙中点的切向应力。其岩壁上切向应力的最大值见式(3.4)所示：

$$\sigma_{\theta\max} = \begin{cases} (\sigma_\theta)_{\text{顶}} = 3\sigma'_H - \sigma'_Z & (\sigma'_H \geq \sigma'_Z) \\ (\sigma_\theta)_{\text{边}} = 3\sigma'_Z - \sigma'_H & (\sigma'_H < \sigma'_Z) \end{cases} \quad (3.4)$$

由式(5.1)可以分别计算地下洞室最大埋深位置的洞身主应力值。结合式(5.2)~(5.4)，也可计算前述位置的隧洞侧向水平应力  $\sigma'_H$ 、轴向应力  $\sigma'_L$  与剪应力  $\tau$  值以及横截面上洞壁最大切向应力  $\sigma_{\theta\max}$ ，见表 3.3。

可知地下厂房地应力量级为低地应力水平。特别说明的是，地应力分级评价基于围岩单轴饱和和抗压强度与初始地应力的比值，当岩体单轴饱和和抗压强度和地应力环境变化导致“强度应力比”值变化，则评价结论需相应调整。

### 2.3.4 厂房长轴线布置分析

CFSK33 地质钻孔孔深 101.3m~426.8m 范围内，测得最大水平主应力范围值为 6.7MPa~17.7MPa，测得最小水平主应力范围值为 4.3MPa~11.4MPa，铅直应力随深度变化范围值为 2.7MPa~11.3MPa，地下厂房区最大水平主应力方向侧压系数

主要集中在1.1~1.4, 应力量值主要呈 $\sigma_H > \sigma_Z > \sigma_h$ 特征, 试验数据表明地下厂房区域初始地应力场大概率是以水平应力场为主导。测试显示最大水平主应力方向为N52° W~N76° W, 呈NNW向。

基于实测应力分布函数, 地下洞室最大埋深处的最大水平主应力为19.1MPa, 最小水平主应力为12.4MPa; 地下厂房深度区域最大水平主应力为11.8MPa~14.2MPa, 最小水平主应力为8.1MPa~9.5MPa。根据规范所得, 试验区地应力等级主要处于低~中等地应力水平。

考虑上述地下厂房长轴线布置原则并将节理裂隙的影响也纳入考虑范围内下(厂房纵轴线应尽可能垂直于岩体主要节理裂隙的走向或与其成较大的夹角, 以防止上游和下游边墙承受较大的侧向压力)。并且还要考虑到布置的厂房长轴线与测试所得的最大主应力方向平行或小角度相交。

综上所述结合水压致裂法测试数据以及现场实际地质情况和结构布置要求, 本次地下厂房长轴线走向定为273°, 届时地下厂房长轴线与本次试验所得最大水平主应力方向(N52° W至N76° W)夹角为11°~35°, 届时地下厂房长轴线就和测试所得最大水平主应力方向形成小角度相交, 这种布置有利于地下厂房围岩的稳定。

### 3 结论

水压致裂法测得的应力是沿地质钻孔轴线方向的, 可以测量出最大水平应力和最小水平应力, 测值直观且具有较大的代表性。

水压致裂法能够较为准确地测量深部地应力, 提供地下厂房布置设计所需的关键参数。这些数据有助于工程师了解地质体的应力状态, 为合理布置地下厂房提供依据。

水压致裂法是一种二维应力测量方法, 其基本假设中的钻孔轴线所代表的铅直应力是其中一个主应力方向, 但这一假设在多数情况下并不成立, 导致主应力方向难以准确确定。因此, 在使用水压致裂法进行地应力测试时, 需要充分考虑其适用性和局限性, 以确保测试结果的准确性和可靠性。

水压致裂法作为一种有效的地应力测试手段, 在地下厂房轴线布置中发挥着重要作用。通过试验测量的数据推导出水平地应力的大小和方向, 为地下厂房长轴线布置提供了比较可靠的科学依据, 确保了工程的安全性和稳定性。未来, 随着技术的不断进步和应用的不断深入, 水压致裂法将在更多地下工程中发挥重要作用。

### 参考文献

- [1] ISRM Suggested Methods for rock stress estimation-Part 2: hydraulic fracturing and/or hydraulic tests of pre-existing fractures. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences, 2003, Vol. 40 (7).
- [2] 《水利水电工程岩石试验规程》(SL/T 264-2020), 长江科学院主编, 中国水利水电出版社, 2020。
- [3] 《工程岩体试验方法标准》(GB/T50266-2013), 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院主编, 中国计划出版社, 2013。
- [4] 《水电工程钻孔压水试验规程》(NB/T35113-2018), 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司主编, 2018。
- [5] 《工程岩体分级标准》(GB50218-2014), 长江科学院主编, 中国计划出版社, 2014。
- [6] 《水工隧洞设计规范》(SL279-2016), 中水东北勘测设计研究有限公司, 2016。
- [7] 《水力发电工程地质勘察规范》(GB50287-2016), 中国电力企业联合会, 2017。

课题: 课题名称: “地应力测试在抽水蓄能电站中的应用研究”

第一作者简介: 韩任清、1988年02月29日出生、男、安徽潜山、高级工程师、硕士研究生、主要研究方向为地质灾害治理以及岩土设计。