中国科学: 技术科学 2012 年 第 42 卷 第 4 期: 359 ~ 368
www.scichina.com tech.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS
自然科学基金项目进展专栏

钻孔局部壁面应力解除法(BWSRM)的原理及其在锦屏二级水电站工程中的初步应用

葛修润[①②③*], 侯明勋[①]

① 上海交通大学岩土力学与工程研究所, 上海 200240;
② 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071;
③ 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071
* E-mail: gexiurun@whrsm.ac.cn

收稿日期: 2011-06-22; 接受日期: 2011-08-18
国家自然科学基金重点项目(批准号: 50639080)、国家自然科学基金面上项目(批准号: 50979054, 50579037)和岩土力学与工程国家重点实验室资助课题(课题号: SKLZ0901)资助

摘要 岩体初始地应力问题的研究在岩石力学与工程领域具有重要意义. 作为地质体组成部分的岩体与其他材料明显不同之处之一就是其内部赋存有地应力状态, 了解地壳某一局部区域地质岩体残余至今的地应力状态是一项极为复杂而又十分重要的研究课题. 对地壳应力状态的认识虽然总体上有一些规律可寻, 但主要手段还是靠现场原位的地应力实测. 简要评述了目前普遍采用的三维地应力测量方法及其不足. 提出了钻孔局部壁面应力解除法(BWSRM)三维地应力测量原理及其具体实施方案, 研制了基于 BWSRM 法为原理的地应力测井机器人, 并将其初步应用于锦屏二级水电站工地埋深达 2430 m 处的地应力实测工作, 验证了 BWSRM 法地应力测量原理的可行性和合理性. BWSRM 法与测井机器人在地应力测井工作中的推广和应用具有十分广阔的前景.

关键词
岩石力学与工程
地应力
地应力测量
应力解除法
锦屏工程

1 地应力实测工作的重要性

在岩体力学和工程领域, 研究岩体的地应力问题具有十分重要的意义. 作为地质体的组成部分的岩体与其他材料明显不同之处之一就是内部赋存有地应力状态, 它本质上是一种内应力, 也是一种初始应力, 从历史进程来看更是一种残余应力.

表层地壳岩体由于自重和经历地质年代多次地质构造运动等因素的作用, 岩体内部赋存有内应力是很自然的事. 岩体经历长期的风化、剥蚀、河流的切割、局部地段的隆起和凹陷、地形地势随岁月的重大变化等地质作用, 虽然历经悠久岁月, 但其内应力至今仍有残余. 要了解某一局部区域地质岩体残余至今的地应力状态是一项十分复杂的课题, 但又十分重要. 虽然总体上有一些规律可寻, 但主要手段还是靠现场原位的地应力实测工作.

就工程角度而言, 例如修建各类隧道、各类地下发电厂、各类用途的地下建筑物或者要进行地下采矿时, 对该工程区域的初始地应力状态进行评价是一项必不可少的十分关键的工作之一, 因为它是这些

英文版发表信息: Ge X R, Hou M X. Principle of in-situ 3D rock stress measurement with borehole wall stress relief method and its preliminary applications to determination of in-situ rock stress orientation and magnitude in Jinping hydropower station. Sci China Tech Sci, 2012, 55: 939–949, doi: 10.1007/s11431-011-4680-x

构筑物修建和运行时的基本荷载的来源之一. 即便是进行坝基工程, 各类边坡工程, 露天采矿工程或是开发油田, 进行深井采油或二、三次采油等工程, 也需要知道该工程区域岩体的地应力场资料. 地应力实测的理论、方法和技术的发展是岩体力学与工程领域的一项前沿研究课题.

就地球科学而言, 地应力测量工作的重要性不言而喻. 地壳板块运动已是公认的事实. 但是要了解和探索发生这种运动的驱动力有多大, 要了解各类大小板块边缘和中部的受力状态与构造运动的关系等重大科学问题时地应力实测工作也是不可或缺的. 正因为如此, 国际上许多科学深钻孔计划中都列入了地应力测井工作. 以国际上著名的德国大陆科学深钻孔计划(KTB)为例[1, 2], 在深达 9100 m 的深钻孔中进行了大量的地应力测井工作, 采用了多种地应力测定方法和评估手段.

2 国内外地应力测量方法简要介绍和评述

2.1 地应力测量方法概述

经过数十年的发展, 国内外的地应力测量方法可大致归纳为如下几类: 水力压裂法(hydraulic fracturing method)[3, 5~9], 应力解除法(relief methods)[4~11], 扁千斤顶法(flat jacking method)[5~7], 应变恢复法(strain recovery method)[5, 6], 钻孔崩落法(borehole breakout method)[5, 6], 差应变应分析法(differential strain curve analysis method)[5, 6, 12], 钻进诱发张裂缝法(drilling induced tensile fracture method) [13], 声发射法(acoustic emission method) [14], 以及地球物理方法等其他测试方法[6].

在三维地应力测量方面, 应用普遍的是前述的第一和第二类方法.

2.2 水力压裂法简介和优缺点评述

水力压裂法的基本原理是在钻孔中用封隔器将钻孔的一段与钻孔其余部分隔开, 并注入高压液体, 根据钻孔岩壁被初始压裂并出现裂缝时的水压力和裂缝位置以及发生重新闭合时的水压力值和由重新张开时的水压力资料, 配合理论计算公式可以算出三维地应力状态.

水力压裂法的优点是: 1)不需套钻; 2)不需精密的下井仪器; 3)不需知道岩体力学性质参数; 4)原则上可在钻孔的不同部位进行试验, 不受测量深度的限制; 5)试验方法步骤简单, 容易实施. 但此方法有一致命弱点, 即此方法在理论是不完备的. 它必须假定地应力一个主方向必定是钻孔的轴向, 此方向的主应力量值也是假定的. 采用垂直钻孔时, 三维地应力张量的一个主方向就必定是该孔的轴向, 即铅垂向. 此主应力的量值就用上覆岩石容重和测点垂直深度来估算. 对于岩层有褶皱、挠曲或有倾斜的情况, 用此法得出的三维地应力张量显然是非常成问题的. 即使用多孔交汇法或其他方法来修正也是很难得到真实的三维地应力张量. 对于地层呈水平状的情况, 钻孔轴向的主应力量值往往也是与前述估算值相差甚远, 而且方向也经常与垂直向有很多的偏离.

2.3 钻孔应力解除法简介及其评述

此方法的基本程序是先钻一直径较大(130~150 mm)的钻孔, 然后在大孔孔底钻一同心的测量小孔, 直径为 36~38 mm 左右; 然后在测量小孔中安装测量探头. 此探头有多种类型, 一类是测量小孔孔径变化的, 另一类很有名的探头, 称为空心包体, 它是通过特殊技术将几组应变花粘贴在小孔孔壁上, 而空心包体本身又对孔壁变化的影响很小. 下一步骤是沿大孔孔壁套钻, 实现应力解除, 这时安装在小孔内的测量探头能感应到相应的数据, 从而可以计算出原位地应力. 这种套芯应力解除法测量的基本步骤可参见图 1. 最著名的三维探头是澳大利亚 CSIRO 空心包体应变计[5, 8].

钻孔应力解除法在测量过程中由于需要套钻, 当钻孔较深时容易出现断芯问题, 因此, 只能在较浅

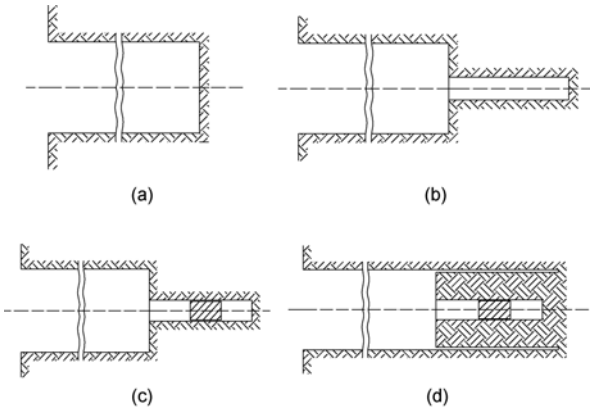


图 1 套芯应力解除法地应力测量基本步骤

的钻孔中使用. 在地应力较高地区岩芯容易饼裂的钻孔中也不太能用.

基于以上分析不难看出, 现在已有的一些地应力测量方法, 特别是关于三维地应力测量方面, 它们都还不能很好适应岩体地应力测量的实际需要. 研究一种理论上完备、实际操作上可行、又能用于深钻孔的三维地应力测定方法是岩体力学与工程方面当前重大的热门课题之一.

3　钻孔局部壁面应力解除法的依据和假定

一般说来, 地壳不同部位的岩体都含有相关区域的地应力场信息, 岩体任何部位的应力和应变都受远场地应力场所制约. 正确把握测量点应力状态与相应远场地应力场的关系, 从一定数量测量"点"获得的地应力状态信息来推导出这些点所在区域的相应远场地应力的 3 个主应力量级和方向是完全可能的. 即便在深钻孔孔壁壁面上的任何"局部壁面"同样也隐含着区域地应力场的信息.

我们假设被测定的钻孔孔壁小区域的岩体为均质、连续、各向同性的线弹性体. 在这样的岩体介质中取远离孔口与孔底影响区之外的一小段钻孔作为研究对象. 该钻孔受围岩远场 6 个地应力分量作用. 基于线弹性岩石力学理论, 可以得出钻孔孔壁上任意一点的正应变与围岩远场应力分量之间的关系并建立两者间的数学方程. 这一关系为利用应变测量来确定该测量小段的远场地应力状态提供了坚实基础. 由于岩体中一点的地应力状态由 6 个应力分量来确定. 根据钻孔孔壁上几个局部壁面正应变与围岩远场应力分量之间存在的基本方程, 只要有不少于 6 组独立的方程就可以由正应变值计算得出 6 个应力分量. 从而也就确定了该一小段测量孔所对应的围岩远场地应力状态.

测定局部壁面上 6 个以上独立正应变的最简便的方法是对钻孔孔壁的几个局部壁面实施侧壁环形取芯套钻以实现应力解除, 并记录应力解除前后粘贴在这几个壁面上的应变片的微应变变化量. 由于含有这几个局部钻孔壁面的一小段钻孔围岩的性质是一致的, 也可认为是同一地受相同的远场地应力场所控制, 从而也就可以把测得的应变综合在一起进行分析而计算得出相应的远场地应力张量. 我们将这一方法称为钻孔局部壁面应力解除法[15, 16], 英文简称为 borehole wall stress relief method, BWSRM.

4　BWSRM 法的基本理论公式

4.1　测量钻孔的坐标系

定义测量钻孔的卡氏直角坐标系 $oxyz$, z 轴与钻孔轴线相同, x 轴、y 轴位于与 z 轴垂直的平面内且相互正交(见图 2). 在 $oxyz$ 坐标系内的远场地应力张量的6个分量分别为 S_{xx}, S_{yy}, S_{zz}, S_{xy}, S_{yx}, S_{zx}. 定义与钻孔直角坐标系 $oxyz$ 相对应的圆柱坐标系为 $or\theta z$(见图 2), 其相应的径向应力、切向应力、轴向应力和剪切应力分量分别为 σ_r, σ_θ, σ_z, $\tau_{r\theta}$, $\tau_{\theta z}$, τ_{zr}. E 和 ν 分别为岩石材料的弹性模量和泊松比.

4.2　钻孔壁面的切向应变、轴向应变和剪应变与远场地应力的关系

作用在各向同性、均质和线弹性岩石材料的钻孔壁面上的 6 个应力分量可用下式表示[17]

$$\sigma_r = \tau_{r\theta} = \tau_{zr} = 0, \tag{1}$$

$$\sigma_\theta = \left(S_{xx} + S_{yy}\right) - 2\left(S_{xx} - S_{yy}\right)\cos 2\theta - 4S_{xy}\sin 2\theta, \tag{2}$$

$$\sigma_z = -2\nu\left(S_{xx} - S_{yy}\right)\cos 2\theta - 4\nu S_{xy}\sin 2\theta + S_{zz}, \tag{3}$$

$$\tau_{\theta z} = 2\left(S_{yz}\cos\theta - S_{zx}\sin\theta\right). \tag{4}$$

定义 ε_θ, ε_z 和 $\gamma_{\theta z}$ 为钻孔壁面某点的切向应变、轴向应变和剪应变分量, 根据虎克定律可以得到

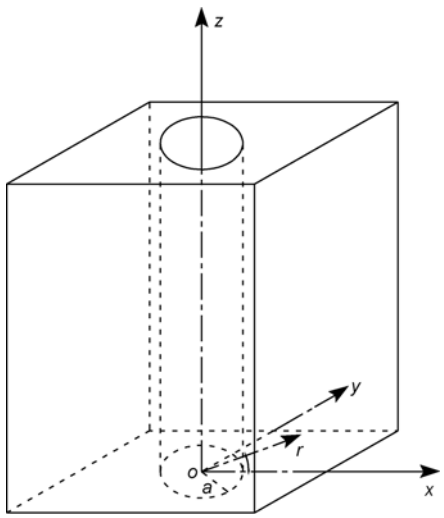


图 2　钻孔坐标系

$$\varepsilon_\theta=\frac{1}{E}\Big[\left(S_{xx}+S_{yy}\right)-2\left(1-\nu^2\right)\left(S_{xx}-S_{yy}\right)\cos 2\theta -4\left(1-\nu^2\right)S_{xy}\sin 2\theta-\nu S_{zz}\Big], \tag{5}$$

$$\varepsilon_z=\frac{1}{E}\Big[S_{zz}-\nu\left(S_{xx}+S_{yy}\right)\Big], \tag{6}$$

$$\gamma_{\theta z}=\frac{4(1+\nu)}{E}\left(S_{yz}\cos\theta-S_{zx}\sin\theta\right). \tag{7}$$

4.3 钻孔壁面上某点正应变与孔周远场地应力张量分量的关系

定义ε_φ为与切向(或环向)夹角为φ方向上的正应变(见图 3), 则有

$$\varepsilon_\varphi=\varepsilon_\theta\cos^2\varphi+\varepsilon_z\sin^2\varphi+\gamma_{\theta z}\cos\varphi\sin\varphi. \tag{8}$$

将(5), (6), (7)式代入(8)式, 得

$$E\varepsilon_\varphi=A_1S_{xx}+A_2S_{yy}+A_3S_{zz}+A_4S_{xy}+A_5S_{yz}+A_6S_{zx}, \tag{9}$$

式中,

$$A_1=\left[1-2\left(1-\nu^2\right)\cos 2\theta\right]\cos^2\varphi-\nu\sin^2\varphi, \tag{10a}$$

$$A_2=\left[1+2\left(1-\nu^2\right)\cos 2\theta\right]\cos^2\varphi-\nu\sin^2\varphi, \tag{10b}$$

$$A_3=-\nu\cos^2\varphi+\sin^2\varphi, \tag{10c}$$

$$A_4=-4\left(1-\nu^2\right)\sin 2\theta\cos^2\varphi, \tag{10d}$$

$$A_5=2(1+\nu)\cos\theta\sin 2\varphi, \tag{10e}$$

$$A_6=-2(1+\nu)\sin\theta\sin 2\varphi. \tag{10f}$$

(9)式给出了钻孔壁面上某点任意方向的正应变与钻孔围岩远场应力之间的基本关系式.

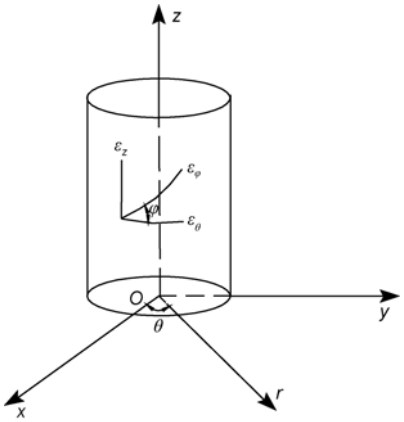


图 3 钻孔孔壁上任意一点的正应变

4.4 采用最小二乘法计算钻孔坐标系的三维地应力张量矩阵

若在钻孔某一小段的测量孔的孔壁上选 3 条平行于钻孔轴线的线(各自的θ角度为θ_1, θ_2, θ_3), 3 条轴线间的角度差$\Delta\theta$以 110~130°为宜. 在每条线上各选一个测量点, 每个点上各贴一个三分量直角应变花, 即φ= 0°, 45°, 90°. 三条线上的测点在轴线方向各相差一定距离使应力解除过程中彼此互不影响. 我们采用环形槽进行应力解除, 那么我们可以得到 9 个相互独立的正应变值. 由于未知量是 6 个, 采用最小二乘法求解矛盾方程组, 最终可以得出该钻孔测量段相对应的钻孔坐标系下的三维地应力张量.

设测量点为 m=1, 2, 3, 每个测点有 3 个应变片 t= 1, 2, 3, 对应于φ= 0°, 45°, 90°. 因此, 共有 n 个($m\times t$)正应变, 正应变表示为ε_i (i=1, ⋯, n), 设

$$[\boldsymbol{g}]=E\cdot\left[\varepsilon_1\quad\varepsilon_2\quad\cdots\quad\varepsilon_n\right]^{\mathrm{T}}. \tag{11}$$

再设 $S_1=S_{xx}$, $S_2=S_{yy}$, $S_3=S_{zz}$, $S_4=S_{xy}$, $S_5=S_{yz}$, $S_6=S_{xz}$, 则可以得到如下的关系式

$$E\varepsilon_i=A_{i1}S_1+A_{i2}S_2+A_{i3}S_3+A_{i4}S_4+A_{i5}S_5+A_{i6}S_6. \tag{12}$$

只需将正应变ε_i 所在的θ和φ值代入(10)式就可求得(12)式中的系数 A_{i1},⋯, A_{i6}. 如果写成矩阵形式, 即为

$$[\boldsymbol{A}][\boldsymbol{S}]=[\boldsymbol{g}], \tag{13}$$

式中,

$$[\boldsymbol{S}]=\left[S_1\quad S_2\quad S_3\quad S_4\quad S_5\quad S_6\right]^{\mathrm{T}},$$

$$[\boldsymbol{g}]=E\cdot\left[\varepsilon_1\quad\varepsilon_2\quad\cdots\quad\varepsilon_n\right]^{\mathrm{T}},$$

[$\boldsymbol{A}$]是一个(n×6)的系数矩阵, 将ε_i 所在位置的θ和φ值代入(10a)~(10f)式可求出矩阵[$\boldsymbol{A}$]的各元素值. 如果 n>6, 则可以通过最小二乘法求解地应力分量矩阵[$\boldsymbol{S}$], 由(13)式得

$$[\boldsymbol{A}]^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{A}][\boldsymbol{S}]=[\boldsymbol{A}]^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{g}], \tag{14}$$

或

$$\sum_{j=1}^{6}K_{kj}S_j=G_k,\quad (k=1,\ 6), \tag{15}$$

式中,

$$K_{kj}=\sum_{i=1}^{n}A_{ki}A_{ij}, \tag{16}$$

$$G_k=\sum_{i=1}^{n}A_{ik}g_i. \tag{17}$$

求解矛盾方程组可得出在钻孔坐标系下的远场地应力张量矩阵

$$[\boldsymbol{\sigma}]_{xyz}=\begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{zx} \\ S_{xy} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{yz} & S_{zz} \end{bmatrix}. \tag{18}$$

4.5　求取大地坐标系的地应力张量矩阵

若要将以钻孔坐标系表达的地应力张量矩阵(18)式变换成大地坐标系的地应力张量矩阵, 需经过坐标变换. 如图 4 所示的大地坐标系 $OXYZ$, X 轴指向东, Y 轴指向北, Z 轴垂直地面向上. 钻孔坐标系的 x 轴位于大地坐标系 $OXYZ$ 的 XY 平面内, 钻孔轴线 z 在大地坐标系 $OXYZ$ 中的方位角为 D, 倾角为 V.

设大地坐标系下地应力张量矩阵为

$$[\boldsymbol{\sigma}]_{XYZ}=\begin{bmatrix} \sigma_{XX} & \sigma_{XY} & \sigma_{ZX} \\ \sigma_{XY} & \sigma_{YY} & \sigma_{YZ} \\ \sigma_{ZX} & \sigma_{YZ} & \sigma_{ZZ} \end{bmatrix}. \tag{19}$$

则通过坐标变换可求得大地坐标系的地应力张量矩阵如下

$$[\boldsymbol{\sigma}]_{XYZ}=[\boldsymbol{L}]^{\mathrm{T}}[\sigma]_{xyz}[\boldsymbol{L}], \tag{20}$$

式中,

$$[\boldsymbol{L}]=\begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x \\ l_y & m_y & n_y \\ l_z & m_z & n_z \end{bmatrix}. \tag{21}$$

变换矩阵[$\boldsymbol{L}$]的元素值用钻孔方位角 D 和钻孔倾角 V 可以表示为

$$\begin{aligned} &l_x=\cos D,\ \ m_x=-\sin D,\ \ n_x=0, \\ &l_y=\sin V\sin D,\ \ m_y=\sin V\cos D,\ \ n_y=-\cos V, \\ &l_z=\cos V\sin D,\ \ m_z=\cos V\cos D,\ \ n_z=\sin V. \end{aligned} \tag{22}$$

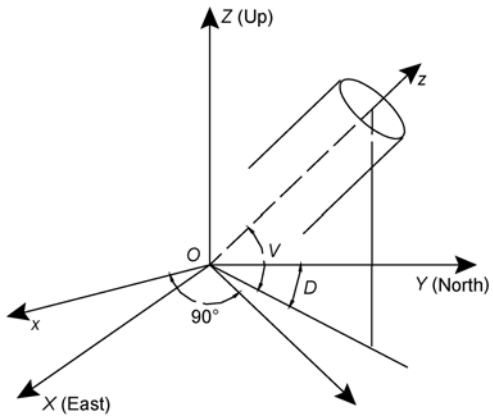


图 4　钻孔坐标系与大地坐标系的相对关系示意图

BWSRM 法地应力测量原理已获得中华人民共和国发明专利授权(专利号: ZL01126815.8).

5　BWSRM 法地应力测量的实施

采用 BWSRM 法进行地应力测量时, 采用的钻孔直径为 150 mm. 选择测量孔段的原则是避开钻孔附近其他建筑物对该段的影响, 保持该小段钻孔岩性完好, 性质相同.

在测量钻孔段的孔壁上选取 3 条平行于钻孔轴线的线, 它们沿孔周布置时彼此间的角度差$\Delta\theta$可在 110~130°间选择, 也可更大, 或更小些. 在每条线上选取直径为 3 cm 的圆形局部壁面, 并且把它们视为测量“点”. 这 3 个局部壁面在钻孔轴线方向上间隔距离应保证对某一局部壁面实施应力解除时不会给邻近的测点应力状态带来影响. 在每个局部壁面上将粘贴一个应变花, 3 个测量点及应变花布置位置见图 5 所示.

采用壁厚为 2 mm、外径为 34 mm 的环形钻头对每个局部壁面进行应力全解除, 图 6 是钻孔局部壁面进行应力全解除的示意图. 解除槽深度 h 与被解除的壁面的直径 d 有关[16, 18]. 实践证明, 当 h/d=1.2 时, 该局部壁面的应力已全部解除, 与数值模拟结果(图 7, 应变花粘贴位置在θ=0°, S_{xx}∶S_{yy}=1∶2)相吻合.

对每个局部壁面在用环形钻头进行应力解除时, 监测粘贴的应变花的微应变值变化与钻进深度的全过程曲线, 根据所取得的各应变片解除过程的应变变化值和钻孔的方位角等参数, 把测得的应变值组合在一起分析最终可得到大地坐标系的三维地应力张量. 分析 3D 地应力张量的工作由我们自编的 BWSRM 法地应力计算程序完成. 但要在钻孔内实施基于 BWSRM 法地应力测量步骤, 显然必须靠特制的具有原创性的地应力测量机器人来实现.

6　基于 BWSRM 法的地应力测井机器人研制

依据所提出的钻孔局部壁面应力解除法(BWSRM)地应力测量原理, 设计制造的地应力测井机器人主要由外连接部、锚固定位装置、应力测量主工作部、电子设备仓、窥视探测部等几部分组成. 整个测量过程完全由计算机控制进行. 地应力测井机器人具有窥视孔壁、锚固定位、对工作面进行局部打

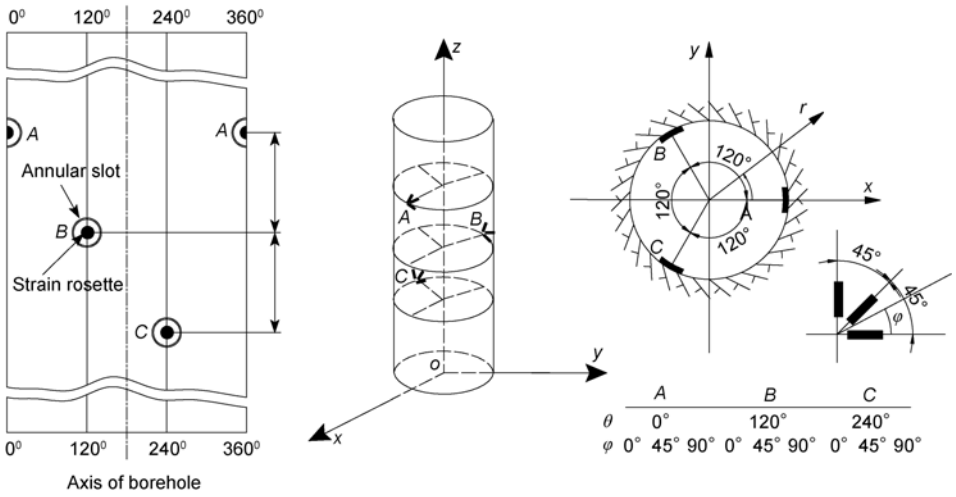


图 5　钻孔测量点及应变花粘贴位置示意图

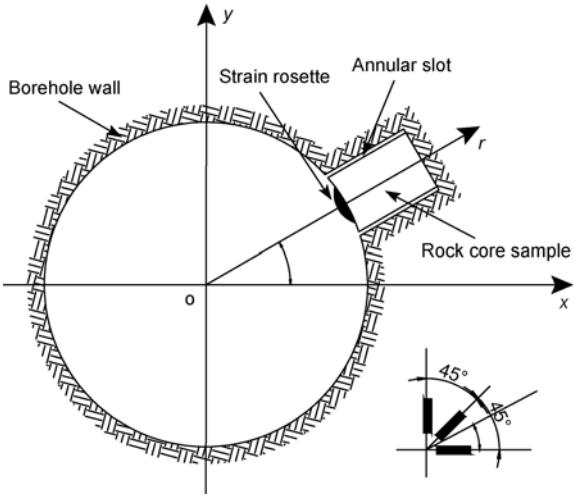


图 6　钻孔局部壁面应力全解除示意图

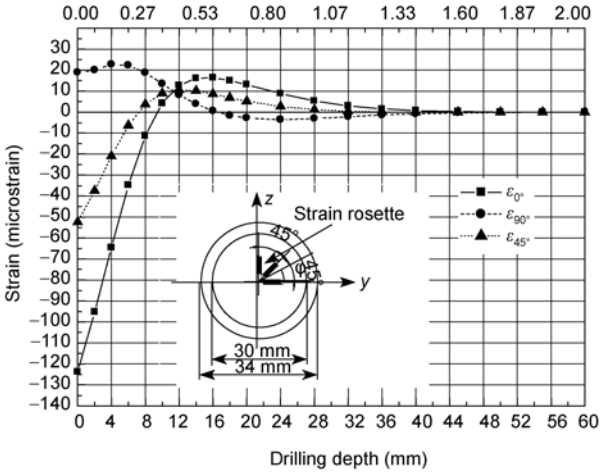


图 7　环形槽解除深度与应变关系曲线

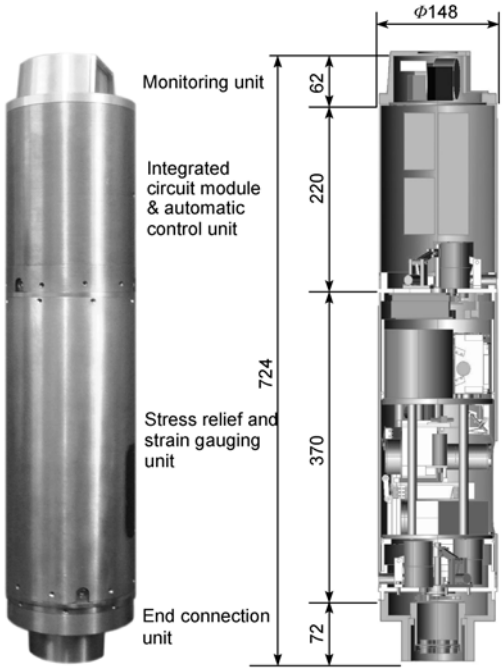
磨处理和风干、自动喷涂胶和自动粘贴应变花至工作面、对工作面实施应力解除作业、实时监测记录应力解除过程中测量面上的微应变变化、自动切割已黏贴电阻应变花上的电线、自动回收钻具等功能.

切割环形槽的钻具的动力由特制的电机供应, 功率 400 W, 体积很小, 对花岗岩、大理岩等岩石只需 3~4 min 就可完成 40 mm 深度的环形槽切割. 机器人中共安装有 7 个不同功率和尺寸的电机, 最小功率仅 2 W. 钻孔局部壁面的打磨技术及打磨组件的设计和试制、以及电阻应变片的自动粘贴是最为关键的技术难题之一. 其中, 应变片自动粘贴机械手的设计和加工制造, 是测井机器人的一项主要特色, 内置的电阻应变仪具有高精度和高稳定性.

BWSRM-H01 型地应力测井机器人外观呈圆柱形, 外径约 148 mm, 全长约 720 mm, 重约 21 kg(如图 8 所示). 其研制经过多次修改、调整到最后定型历经 7 年时间, 对各个主要部件都经过在实验室各项试验的验证, 整个机器人组装完成后又用了近一年的时间在实验室特制的试验平台上进行了模拟现场条件的严格试验, 正因为如此, 我们应用 BWSRM-H01 型机器人于 2010 年 8 月 5 日至 12 日在位于四川省西昌市境内的雅砻江上的锦屏二级水电站工地埋深达 2430 m 深处的科研试验洞中进行首次试验时一举成功.

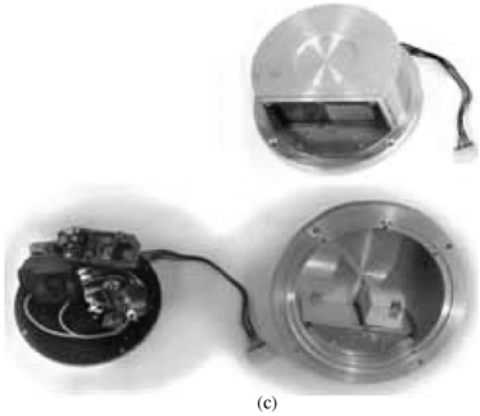
7　应用 BWSRM 方法和地应力测井机器人在锦屏二级水电站工程中的初步应用

采用 BWSRM 法和自主研发的地应力测井机器



(a)

(b)



(c)

图 8　基于 BWSRM 法地应力测井机器人照片

(a) 机器人外形及分部结构图; (b) 机器人拆散后各部件照片; (c) 机器人探测部外观及其分部结构

人于 2010 年 8 月和 9 月在位于四川省西昌市境内的雅砻江锦屏二级水电站工地上进行了现场试验. 根据该水电站工地的实际情况, 我们选择在深部试验平硐壁上钻轴线上倾约 3°的近水平钻孔作为测量地应力的测量钻孔.

锦屏二级水电站利用雅砻江 150 km 锦屏大河湾的天然落差截弯取直, 在上游引水口开挖 4 条巨型长输水隧洞(每条长约 17 km, 内径约 13 m)引到下游地下水力发电厂. 发电总装机容量为 4800 MW, 共安装 8 台 600 MW 的水轮发电机组[19]. 引水隧洞穿过锦屏山的崇山峻岭, 地质条件复杂, 地应力高, 存在岩爆, 地下水丰富, 分布复杂. 科学合理实测地应力值是设计和施工方迫切需要的重要数据, 特别是引水洞和地下厂房所在区域位于锦屏山顶下约 2400 m 深度处的地应力资料更为珍贵. 在我们试验之前在该深度区有单位曾经用水力压裂法和其他已有的方法进行地应力测试, 但都未获成功. 因此, 当我们进行此新方法试验时还缺乏其他方法测量的可供对比的地应力资料. 图 9 是锦屏二级水电站的施工现场. 图 10 是地下巷道和地下硐室的空间分布示意图.

基于 BWSRM 法地应力现场试验是在锦屏二级水电站科研试验洞 2#试验支洞(AK 8+850, 其断面为 3 m×2.2 m(宽×高))内的试验支洞 C 里进行的(其断面为 3 m×2.2 m(宽×高), 试验地点的地层埋深约 2430 m, 属白山组 T2b 地层, 岩石为大理岩. 图 11 是试验洞所在位置示意图. 试验孔均位于试验支洞 C 内, 成孔直径ϕ150 mm, 孔深 20 m, 试验孔均为近水平钻孔, 其轴线相对于水平面上仰 3°.

地应力测量试验由测井机器人按照设定的程序进行. 图 12 是在 1#孔距孔口 6.94~7.71 m 试验孔段上对一钻孔局部壁面进行应力解除时得到的微应变与解除孔深的关系曲线. 地应力测试时所选取的局部孔段的壁面光滑、完整, 测量孔段的孔壁上无裂缝或孔壁崩落掉块等现象. 地应力分析时所需的弹性模量和泊松比参数可由试验孔取芯获得的岩芯样加工成标准圆柱形岩样(直径 50 mm, 高度 100 mm)通过室内单轴和三轴压缩试验来确定. 图 13 是在 MTS 试验机上获得的某标准岩样的三轴加载-卸载试验曲线, 试验是在 45 MPa 围压条件下进行的, 据此整理出的岩石弹性模量和泊松比值为: E=68.0 GPa, ν=0.11. 用 BWSRM 地应力计算程序分析得出的大地坐标系下的三维地应力张量见表 1, 空间展布状态见图 14.

图 9　锦屏二级水电站的施工现场

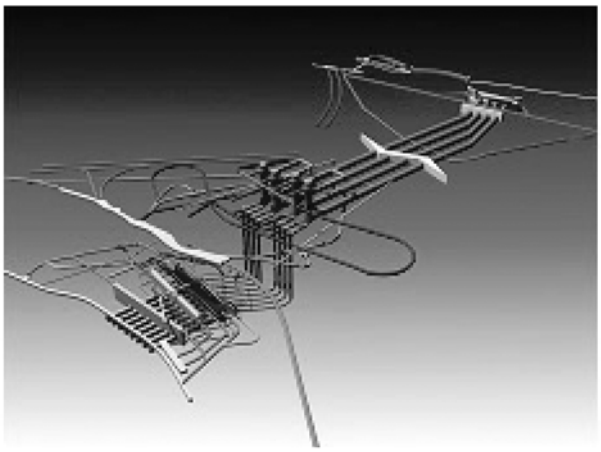


图 10　锦屏二级水电站地下巷道和地下硐室的空间分布示意图

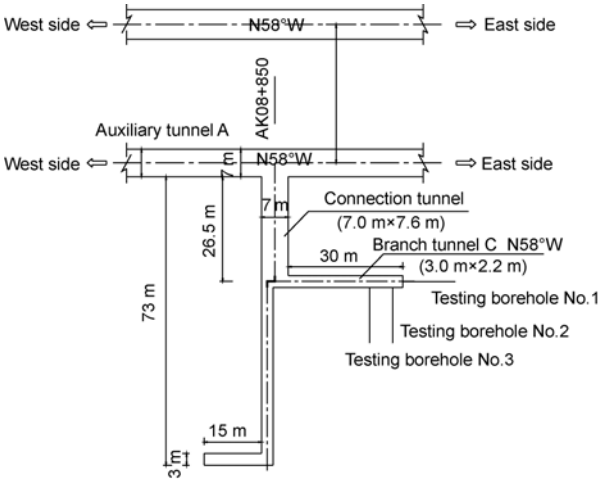


图 11　地应力测试钻孔位置示意图

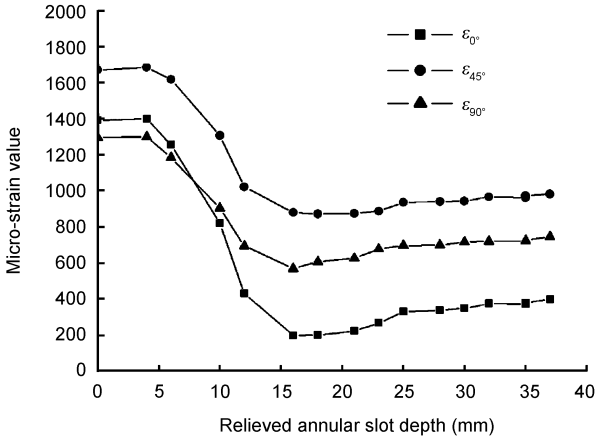


图 12　应力解除过程中应变花三个电阻应变片的微应变值随解除孔深的关系曲线

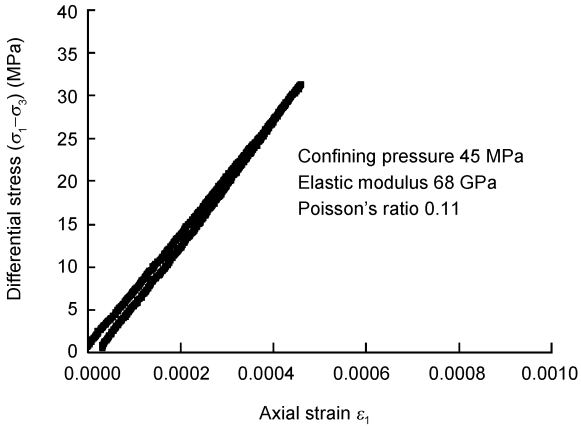


图 13　室内三轴加卸载试验曲线

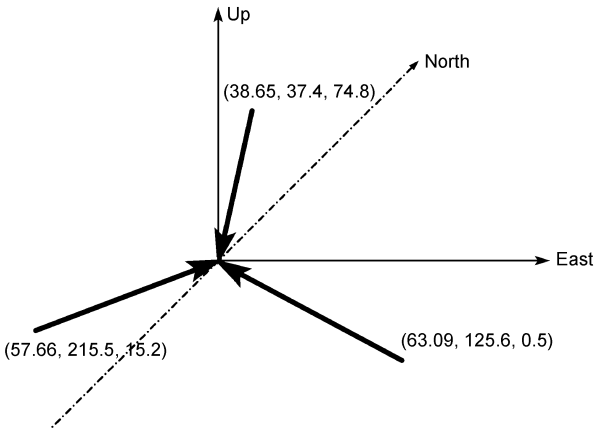


图 14　锦屏二级水电站试验支洞 C 内地应力张量σ_1, σ_2, σ_3的空间方位图

表 1　锦屏二级水电站工地锦屏山下 2430 m 埋深处位于试验支洞 C 内测量点在大地坐标系下的三维地应力张量

The principal stresses	Magnitude (MPa)	Azimuth angle (°)	Obliquity angle (°)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio
σ_1	63.09	125.6	0.5		
σ_2	57.66	215.5	15.2	68.0	0.11
σ_3	38.65	37.4	74.8		

从测出的地应力张量来看, 有如下特点: 1) 最接近于垂直向的主地应力恰恰是最小主应力, 它与铅垂线夹 15°左右的角度, 方位为 37.4°, 其量值远小于用上覆岩层自重估算的值(63 MPa), 仅为 38.65 MPa. 这与深部岩体地应力分布的一般特征相一致, 即垂向主地应力的量值一般都小于上覆岩层重量, 而且其方向也并不完全垂直, 而是与竖直方向有一定偏差; 2) 第一主应力与第二主应力很接近, 其差值仅为 5.43 MPa, 仅是σ_1和σ_2的平均值 60.37 MPa 的 8.26%.

我们也对 E 和ν对地应力张量的影响做过分析. 可以看出: 1) 当ν=0.11 保持不变, 而 E 取值增加 5 GPa 或减小 5 GPa 时, 3 个主应力都相应增大或相应减小, 但是 3 个主应力的方位角和倾角不发生变化. 2) 当保持E值不变, ν值增加时, 3 个主应力量值增加, ν值减小时, 3 个主应力量值都减小, 且ν值的变化对 3 个主应力的方位角和倾角都有影响. 一个小区域的地应力场的研究要经过许多地应力测试资料综合分析, 也需要用不同方法测得的地应力结果予以对比和综合评判才能得到比较合理和科学的结论. 我们目前作的现场测试工作仅是初步的, 有待于今后进一步补充, 有待其他测试方法在该地区获得结果后作比对, 工作还任重而道远.

8　结论

就 BWSRM 法和地应力测井机器人用于锦屏工地的情况来看: 1) 我们认为此项地应力测定新方法的原理的可行性和合理性已得到了验证. 2) 基于此方法研制的地应力测井机器人也是成功和有效的. 3)BWSRM 法与测井机器人在地应力测井工作中的推广和应用具有十分广阔的前景.

致谢　对涂光骞和陈文华同志在机器人研制和现场试验方案制定方面的重大帮助深表谢意!

参考文献

1 Emmermann R, Lauterjung J. The german continental deep drilling program KTB: Overview and major results. J Geophys Res, 1997, 102: 18179–18201
2 Brudy M, Zoback M D, Fuchs K, et al. Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: Implications for crustal strength. J Geophys Res, 1997, 102: 18453–18475
3 Haimson B C, Cornet F H. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation—Part 3: Hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF). Int J Rock Mech Min Sci, 2003, 40: 1011–1020
4 Sjöberg J, Christiansson R, Hudson J A. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation—Part 2: Overcoring methods. Int J Rock Mech Min Sci, 2003, 40: 999–1010
5 Amadei B, Stephansson O. Rock Stress and its Measurement. London: Chapman & Hall, 1997
6 蔡美峰, 乔兰, 李华斌. 地应力测量原理和技术. 北京: 科学出版社, 1995
7 刘允芳. 岩体地应力与工程建设. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2000
8 Fairhurst C. Stress estimation in rock: A brief history and review. Int J Rock Mech Min Sci, 2003, 40: 957–973
9 Ljunggrena C, Chang Y, Janson T, et al. An overview of rock stress measurement methods. Int J Rock Mech Min Sci, 2003, 40: 975–989
10 王连捷, 潘立宙 廖椿庭, 等. 地应力测量及其在工程中的应用. 北京: 地质出版社, 1991

11 Sugawara K, Obara Y. Draft ISRM suggested method for in situ stress measurement using the compact conical-ended borehole overcoring (CCBO) technique. Int J Rock Mech Min Sci, 1999, 36: 307–322

12 Oikawa Y, Matsunaga I, Yamaguchi T. Differential strain curve analysis to estimate the stress state of the Hijiori hot dry rock field, Japan. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1993, 30: 1023–1026

13 Brudy M, Zoback M D. Drilling-induced tensile wall-fractures: Implications for determination of in-situ stress orientation and magnitude. Int J Rock Mech Min Sci, 1999, 36: 191–215

14 Lavrov A. The Kaiser effect in rocks: Principles and stress estimation techniques. Int J Rock Mech Min Sci, 2003, 40: 151–171

15 葛修润, 侯明勋. 一种测定深部岩体地应力的新方法——钻孔局部壁面应力全解除法. 岩石力学与工程学报, 2004, 23: 3923–3927

16 Ge X R, Hou M X, Wang S L. A new approach for measuring the in situ 3D rock stress tensor in drilled borehole. In: Proceedings of International Symposium on In-situ Rock Stress, Trondheim, Norway, 19-21 June 2006. In: Ming L, et al., eds. London: Taylor & Francis/Balkema, 2006. 185–192

17 Hiramatsu Y, Oka Y. Determination of the stress in rock unaffected by boreholes or drifts from measured strains or deformations. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1968, 5: 337–353

18 侯明勋, 葛修润. 三维地应力计算模型研究. 岩土力学, 2007, 28: 2017–2021

19 Wu S Y, Shen M B, Wang J. Jinping hydropower project: main technical issues on engineering geology and rock mechanics. Bull Eng Geol Environ, 2010, 69: 325–332