

陈宗基讲座

三维地应力 BWSRM 测量新方法 及其测井机器人在重大工程中的应用



葛修润^{1, 2}, 侯明勋²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 上海交通大学 岩土力学与工程研究所, 上海 200240)

摘要: 地壳上层岩体的应力状态是地壳最重要的性质之一, 获取岩体应力状态最直接、可靠的手段是原位地应力测量。首先简要回顾地应力测量的研究历程及其发展现状, 分析岩石力学与工程中常用的几种地应力测量方法和技术。重点介绍钻孔局部壁面应力解除法(BWSRM)这一新的三维地应力测量方法的原理, 以及基于 BWSRM 的地应力测井机器人研制过程和具体实施步骤。最后给出地应力测井机器人在锦屏水电站埋深达 2 430 m 处科研试验洞内的试验结果。研究表明, 测点位置的围岩地应力以水平主应力为最大主地应力, 而接近垂直方向的地应力分量则为最小主地应力; 第一和第二主应力量值比较高, 而且两者量值也比较接近。

关键词: 岩石力学; 地应力; 三维地应力测量; 应力解除法

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2011)11 - 2161 - 20

A NEW 3D IN-SITU ROCK STRESS MEASURING METHOD: BOREHOLE WALL STRESS RELIEF METHOD(BWSRM) AND DEVELOPMENT OF GEOSTRESS MEASURING INSTRUMENT BASED ON BWSRM AND ITS PRIMARY APPLICATIONS TO ENGINEERING

GE Xiurun^{1, 2}, HOU Mingxun²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: It is important to conduct a research on the stress state of the rock masses in the upper earth's crust. In-situ rock stress measurement is the basic and reliable access to obtain the stress state of the rock masses. The development of in-situ rock stress measurement and state-of-art of research on it are overviewed. Then, several in-situ rock stress measuring methods and techniques are briefly analyzed in rock mechanics and engineering. A new method, borehole wall stress relief method(BWSRM) to determine the in-situ 3D rock stress tensor in a single drilled borehole is deliberated. An original geostress measuring instrument typed by BWSRM-H01 is designed and manufactured based on the principle of in-situ rock stress measurement with BWSRM. The in-situ test for rock stress with BWSRM is carried out at an experimental tunnel in Jinping II hydropower station, China, where

收稿日期: 2011 - 09 - 28; **修回日期:** 2011 - 10 - 14

基金项目: 国家自然科学基金“雅砻江水电开发联合研究基金”重点项目(50639080); 国家自然科学基金面上项目(50979054); 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室资助课题(SK LZ0901)

作者简介: 葛修润(1934 -), 男, 中国工程院院士, 1959年毕业于前苏联敖德萨水利工程学院水工结构专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石力学与工程、岩土工程数值分析方法、水工结构等方面的教学与研究工作。E-mail: gexiurun@whrsm.ac.cn

the buried depth of overburden is about 2 430 m. It is shown that the two principal stress components close to the horizontal direction are the maximum and intermediate principal stress respectively; while the stress component close to vertical direction is just the minor principal stress in the testing site. The magnitudes of the maximum and the intermediate principal stress are high; and both of them are very close.

Key words: rock mechanics; in-situ rock stresses; 3D in-situ rock stress measurements; stress relief method

1 引言

地壳上层岩体的应力状态是地壳最重要的性质之一,充分理解和理解地壳岩体应力状态不仅是地质力学与地球物理学、更是岩体力学与工程中十分重要的问题之一,而原位地应力测量是获取其应力状态资料最直接、最可靠的手段。随着我国社会基础设施建设的飞速发展,各种岩体工程的规模越来越宏大,对工程设计和施工质量的要求也越来越高,而岩体应力又是影响岩体稳定和工程安全的重要参数之一。

岩体作为地壳表层的组成物质,在漫长的地质年代里,由于地球的各种动力运动过程和其自重,使地壳物质产生了内应力效应,地应力是岩体初始应力的统称。地应力的成因极其复杂,初始地应力的“初始”是相对于因工程开挖引起的应力重新分布而形成的二次应力而言的,是天然岩体在工程建设开挖或扰动之前所具有的自然应力状态,它也是岩体与其他材料具有的本质区别。虽然它本质上是一种内应力,但从历史进程来看是一种残余应力。

地壳表面和内部发生的各种地质构造现象(包括浅源地震的发生)及其伴生的各种物理现象与化学现象都与地壳应力的作用密切相关^[1]。地壳应力环境变化是导致地壳变形、断裂、褶皱乃至地震发生的最直接动因。解决诸如板块驱动机制、地球的能量平衡、地震发生机制、区域地壳稳定性、地震预报与控制、震源物理学和构造应力场、褶皱变动与断裂变动的力学机制等地球科学问题都需要深入了解地壳岩体的应力状态,加之地壳与人类生存空间有着密切的联系,研究地壳岩体应力状态更显得富有实际意义。另一方面,目前的地应力实测资料主要集中在地表以下 1 000 m 范围之内,对于较深部位的岩体地应力测量数据比较稀缺。因此,研究较深部位的岩体初始地应力状态是地球科学基础研究的需要。

在人类的生产实践活动中,无论是在岩基上建设水利水电工程,还是在岩体之中开挖山地隧道、

修建地下电厂、兴建城市地铁等地下空间工程,岩体地应力都是一个不可避免的重要因素。岩体高边坡开挖以及地下空间开挖必然使围岩应力场和变形场重新分布,引起围岩损伤,严重时甚至导致失稳、垮塌和破坏,从而引起严重的工程事故。岩体工程问题中的这种十分重要的开挖“荷载”都是由于在具有初始地应力场的岩体中进行开挖或扰动而引起的,初始地应力是形成开挖“荷载”的根本原因。如何尽可能准确地测定岩石的初始地应力并评估岩体初始地应力场,以及如何合理地计算工程问题中的开挖“荷载”及其对工程稳定性和安全的影响一直是岩体力学与工程问题中的重要研究课题之一。因此,有关地应力测量理论、方法和技术的研究,岩体初始地应力场的数值模拟方法的研究,以及地应力测试设备的开发研制,在我国岩体力学发展史上一直占有十分重要的地位。

地应力测量与研究在能源开发利用方面也有着极为重要的现实意义和经济意义。地应力是油气运移、聚集的动力之一,地应力作用下所形成的储层裂缝、断层及构造是油气运移、聚集的通道和场所之一,现今地应力场影响和控制着油气田开发过程中油、气、水的动态变化。通过分析地应力与裂缝的关系可以研究油气运移与聚集的规律,寻找含油气盆地。根据地应力的分布特征和储集层岩性参数,不仅可以预测裂缝扩展的规律,为制定合理的油气田开发方案提供依据,而且还可以建立地层压力(破裂压力和坍塌压力)剖面来预测石油钻井工程井眼的稳定性。因此,地应力是油田开发方案设计、水力压裂裂缝扩展规律分析、地层破裂压力和地层坍塌压力预测的基础数据,获取准确的地应力资料对于油气田勘探开发具有重要意义。

地应力测量在科学钻探的测井工作中占有十分重要的地位,科学意义重大。大陆科学钻探是当代地球科学具有划时代意义的系统工程,通过它可以帮助人们直接、精确地了解地壳、地质结构与构造以及各种地质过程。深部地壳应力的测量与研究是大陆科学钻探计划的重要课题之一,以著名的德国大陆科学深钻计划(Kontinentales Tiefbohrprogramm

der Bundesrepublik Deutschland, KTB)为例, KTB 钻探项目已在地应力测量研究领域取得了重要的研究成果^[2-4]。KTB 主孔钻深达 9 100 m, 采用多种地应力测试方法和手段, 绘制了 KTB 主孔整个孔深的地应力剖面, 研究了深部地壳应力的分布规律, 评价了地壳强度。位于我国江苏东海县境内的中国大陆科学钻探工程也于 2001 年 6 月开始实施, 2005 年 3 月结束, 完钻深度超过 5 000 m, 同时也做了一些地应力实测和分析工作^[5]。

总之, 为了适应地球科学基础研究和岩体力学与工程的需要, 积极开展地应力测量方法和技术的研究, 不仅具有重大理论意义, 也有广阔的应用价值。

2 地应力测量与研究历程及其发展现状

虽然人类有记载的生产实践活动已有几千年的历史, 但人们对地应力的认识只是近百余年的事情。19 世纪末 20 世纪初, 瑞士著名的地质学家海姆(Heim)通过观察阿尔卑斯山大型越岭隧洞围岩的工作状态, 发现隧洞在各个方向都承受着很高的压力, 首次提出了地应力的概念, 并于 1905~1912 年提出了地应力为“静水压力”的假说, 即著名的 Heim 假说: 岩体地应力的垂直分量与水平分量相等, 其大小等于上覆岩体的重力 γH (其中, γ 为岩石的容重, H 为深度)^[6-8]。20 世纪 20 年代中期, 苏联学者金尼克(Диник)根据弹性理论提出岩体应力的垂直分量为 γH , 而水平分量为 $[\nu/(1-\nu)]\gamma H$ (其中, ν 为泊松比, $\nu/(1-\nu)$ 为侧压系数)^[6-8]。认为地应力只与重力有关的观点代表了 20 世纪早期一些学者较为普遍的看法, 其不同点只在于侧压系数有所差异。但断裂、褶皱等许多地质现象都表明地壳中存在着巨大的水平地应力。我国地质学家李四光^[6]就曾指出: 在构造应力作用仅影响地壳上层一定厚度的情况下, 水平应力分量的重要性远远超过垂直应力分量。

后来越来越多的地应力实测资料表明, 海姆和金尼克所提出的假说与某种特殊的地应力状态比较接近, 但总体来说, 这些假说与地应力状态分布的普遍规律存在一定的差别。20 世纪 50 年代初期, 瑞典科学家哈斯特(Hast)发明了测试地应力的仪器, 首先在挪威的纳维亚半岛进行了地应力测量工作, 测得了岩石中的绝对应力值及其方向^[6-8]。哈斯特通

过对测得的大量数据进行分析和研究, 发现存在于地壳上部岩石中的地应力大多呈水平状或近水平状, 且水平应力值高于垂直应力值, 甚至高出几倍、十几倍^[6-8]。这一发现从根本上动摇了地应力以垂直应力为主的观点。大量的地应力实测数据和研究表明, 在地壳岩体中普遍存在着水平方向的构造应力, 而且构造应力的分布是不均匀的。由此也使人们逐渐认识到重力作用和构造运动是地壳应力形成的主要原因。

事实上, 产生地应力的原因是十分复杂的, 要弄清楚所有因素尚有困难。但就岩体工程建设本身而言, 工程岩体中地应力的主要来源是岩体自重和各种地质构造运动, 而实测地应力的工作具有直接、重要的意义。

地应力的实测工作起始于 20 世纪 30 年代, 1932 年, 美国人劳伦斯(Lieurace)在胡佛水坝(Hoover Dam)下面的一个隧道中采用岩体表面应力解除法, 首次成功地进行了原岩应力的测量, 从而开创了现场地应力测量的先河^[7]。之后一段时期, 地应力测试技术主要停留在岩体表面应力测量上, 发展缓慢。20 世纪 50 年代, 哈斯特(Hast)采用应力解除法和压磁变形计在现场进行了大规模的地应力测量, 并于 1958 年首次公布了他于 1952~1953 年在瑞典拉伊斯瓦尔(Laiswall)铅矿和挪威的纳维亚半岛(Scandinavian Peninsula) 4 个矿区的地应力测量结果, 首次测得近地表地层中的水平应力常常高于垂直应力的现象^[8], 引起了人们的关注。

20 世纪 60 年代中期之前, 地应力测量基本是平面应力测量, 即通过一个单孔或一点的测量只能确定该点在某一剖面上的应力状态^[7]。平面应力测量所采用的地应力测试方法主要有扁千斤顶法、刚性圆柱应力计法、光弹应力计和应变计法等。这一时期, 最具代表性的孔径变形计是哈斯特研制的压磁应力计和美国矿务局研制的 USBM 钻孔变形计等, 而孔底应变计是南非黎曼(Leeman)研制的 CSIR 孔底应变计^[8]。进入 20 世纪 60 年代中期后, 由于岩体力学、数值分析方法、工程测量等学科的形成和发展, 促使地应力测量理论和测试技术也得到了不断创新和发展, 逐渐出现了三维地应力测量技术, 即通过一个单孔的测量可以获得岩体中某点围岩的三维地应力状态。20 世纪 60 年代末至 70 年代, 南非科学和工业研究委员会(CSIR)研制的三轴孔壁应变计在世界范围得到广泛应用。20 世纪 70 年代中期, 澳大利亚联邦科学和工业研究组织(CSIRO)岩石力

学部研制的 CSIRO 型三轴空心包体应变计取代了三轴孔壁应变计得到推广,成为当时最主要的地应力解除测量方法。

为了解决钻孔地应力测量中地下水的影响,并克服直接在孔壁壁上黏贴电阻应变计(花)的困难,瑞典国家电力局(SSPB)在 20 世纪 80 年代初成功研制了水下钻孔三向应变计,同时还开发了带有数据自动采集系统的井下三向应变计探头,从而使深钻孔应力测量技术达到了一个新的发展水平,其最大测量深度已达到 510 m^[8]。

最近 40 a 来,套芯应力解除法和水力压裂法一直在工程地应力测量领域占主导地位。对于埋深超过 1 000 m 的深部岩体地应力测量,目前只有水力压裂法。水力压裂法地应力测量最初是从石油开采过程中对油井实施水力压裂增产技术发展而来的岩体应力测量方法。从本质上讲,水力压裂法是一种平面应力测量方法。但该方法在确定地应力大小和方向时做了一些假定,从而使得测量结果的可靠性存在疑问。尽管水力压裂法有其自身的弊病,但它在深部地应力测量中功不可没,发挥了其他地应力测量方法不可替代的作用,深部地壳应力实测数据资料目前主要是通过水力压裂法获得。水力压裂法在工程应用领域的最大测量深度已达到 5 105 m(美国)^[8]。近年来随着国际大陆科学钻探计划(ICDP)的不断实施,地应力测量已成为其中的一项重要研究内容,而水力压裂法是大陆科学钻探计划深孔应力测量的最有效手段。根据德国 KTB 的研究成果^[3-4],通过对传统水力压裂法进行改进,已将其成功应用于 KTB 主孔 6 000 m 以上的地应力测量,从而为绘制整个 KTB 钻孔深度上完整的地应力剖面提供了重要的实测数据。

我国的地应力测量技术和设备的研制起步较晚,起始于 20 世纪 50 年代末期,这方面的先驱当推著名地质学家李四光院士指导的中国地质科学院地质力学研究所和陈宗基院士指导的长江科学院三峡岩基专题研究组及中国科学院武汉岩土力学研究所的研究工作。我国的地应力实测工作从 20 世纪 60 年代初就已开始,中国地质科学院地质力学研究所在 20 世纪 60 年代初首先研制出了压磁式应力计(Hast 应力计),并于 1966 年 3 月首先在河北隆尧建立了第一个地应力观测站^[8]。1962~1964 年在三峡平善坝坝址,采用应力解除法获得了岩体表面应力测量成果^[8]。1964 年,在陈宗基院士的领导下,中国科学院武汉岩土力学研究所在湖北大冶铁矿进行

了国内首次应力解除测量,测量深度为 80 m。20 世纪 70 年代,中国科学院武汉岩土力学研究所研制出了 36-2 型钻孔变形计,该变形计具有较高的精度和可靠性,在二滩水电站、小湾水电站等重要工程建设的地应力测试中得到了成功应用。另外,国家地震局地震大队与地矿部地质力学研究所也在这一时期联合研制成功了 YG-73 型压磁应力计,后来又发展了其改进型 YG-81 型压磁应力计。

20 世纪 70 年代以后,地应力测量技术获得了普遍的发展和广泛应用,中国科学院武汉岩土力学研究所、中国科学院地质研究所、国家地震局地壳应力研究所、冶金部长沙矿冶研究院、昆明水电勘测设计研究院、成都水电勘测设计研究院、东北水电勘测设计院科研所、长江科学院等单位都有专门组织进行地应力的测量和研究工作^[8]。这一时期,在我国普遍采用的地应力测量设备是压磁式钻孔应力计、“门塞式”孔底应变计、孔径变形计、利曼三轴孔壁应变计、空心包体应变计等。其中,压磁应力计主要在地震部门广泛用于长期应力变化监测。

20 世纪 80 年代以后,地矿部地壳应力研究所率先在国内开展了水力压裂地应力测量的研究工作,并于 1980 年 10 月在河北易县首次成功进行了水力压裂法地应力测量,从而迈出了我国深钻孔地应力测量的第一步,我国的水力压裂地应力测量深度也已突破 2 000 m 大关(大港油田)^[8]。同时,中国科学院武汉岩土力学研究所也成功研制出了空心包体应变计,并将其应用于现场监测。另外,地质力学研究所和长江科学院也都研制出了空心包体应变计。1984 年,长江科学院还引进了瑞典的深钻孔水下三向应变计,并对其进行了改进,最大测量深度已达 307 m^[8]。

1990 年以来,北京科技大学在地应力测试理论方面进行了系统地研究,在室内试验研究和现场实测的基础上,提出了一系列考虑岩体非线性、不连续性、非均质性、各向异性和正确的温度补偿等大幅度提高应力解除法测量精度的技术和措施^[7]。为了解决现有地应力测量方法和技术中存在的不足,中国科学院武汉岩土力学和上海交通大学先后进行了新的地应力测量方法和技术的研究,并原创性地提出了新的三维地应力测量方法——钻孔局部壁面应力解除法(borehole wall stress relief method, BWSRM)^[9-12]。基于 BWSRM 的地应力测量设备——地应力测井机器人已于 2010 年研制成功,并在我国锦屏 II 级水电站的科研试验洞成功地进行了首次现

场原位地应力测试试验^[13]。

3 地应力测量方法简介

经过数十年的发展, 国内外已发展和应用的地应力测量方法比较多, 大致可归纳为如下几类: 水力压裂法(hydraulic fracturing method)^[7-8, 14-18], 应力解除法(relief methods)^[7-8, 16-20], 扁千斤顶法(flat jacking method)^[7-8, 16], 应变恢复法(strain recovery method)^[7, 16], 钻孔崩落法(borehole breakout method)^[7, 16], 差应变曲线分析法(differential strain curve analysis method)^[7, 16, 21], 钻进诱发张裂缝法(drilling induced tensile fracture method)^[22], 声发射法(acoustic emission method)^[23], 以及地球物理方法等其他测试方法^[7]。在三维地应力测量方面, 应用普遍的是水力压裂法和应力解除法。

3.1 水力压裂法

采用水力压裂技术测量原位地应力的方法最早是由 M. K. Hubbert 和 D. G. Willis^[24]于 1957 年提出的, 之后, 在 20 世纪 60 年代 A. E. Scheidegger 等^[25]从理论和试验方面进一步完善和发展了该方法。水力压裂法地应力测量的基本原理是将一对可膨胀橡胶封隔器固定在预定的钻孔深度上, 上、下封隔一小段钻孔作为测量孔段, 然后向测试层段泵入高压流体直至钻孔孔壁岩石发生破坏, 从而在孔壁周围地层中诱发形成人工水力裂缝。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重新张开时的水压力资料, 基于基本假设, 配合理论计算公式可以得出三维地应力状态。图 1 为一典型的水力压裂试验曲线^[8], 图中给出了 2 个水力压裂循环过程中的孔壁裂缝扩展以及压力变化情况, 其中, σ_H 和 σ_h 分别为最大和最小水平主应力, P_b , P_s 和 P_r 分别为破坏压力、关闭压力和裂缝重张压力。水力压裂法不仅是目前进行深部地应力测量最为有效、成熟的方法, 而且也是国际大陆科学钻探计划(ICDP)中开展深部地壳应力测量时重点研究的一种测量手段。

水力压裂法的优点是, 在进行地应力测量时不需要钻取岩芯和测定岩石弹性力学等性质参数, 也不需要精密的下井仪器, 并且在理论上也不受测量深度的限制。这也是它被提出后得到广泛应用的重要原因。但水力压裂法本身也存在着局限性, 比如

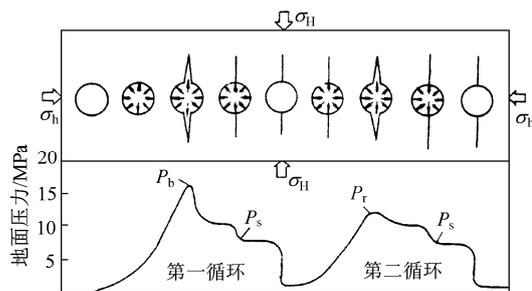


图 1 典型的水力压裂试验曲线^[8]

Fig.1 Curve of pressure versus time for hydraulic fracturing operation^[8]

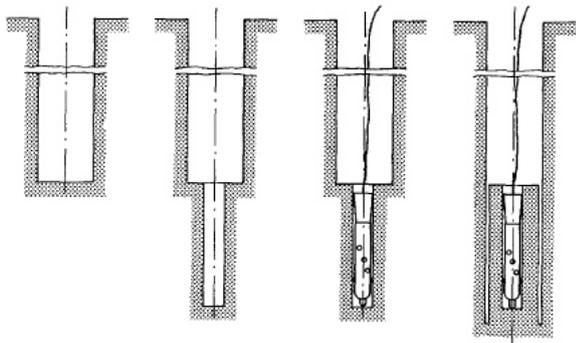
其假设条件之一是地应力张量的一个主轴必须与钻孔轴向一致, 且这一方向的主应力是估算的。就垂直孔而言, 其一个主应力就是垂直向, 且量级等于 γh 。这一基本假定使得测量结果的可靠性存在疑问。且数据资料分析必须依靠对水力压裂试验曲线上关键点的准确识别, 否则得到的结果就可能无法应用。特别是钻孔轴线方向必须与一个主地应力的方向一致这一前提条件, 使该法在地质条件复杂地区应用时, 其测量数据的科学性、可靠性是值得商榷的。

3.2 应力解除法

应力解除法的基本思想是: 采用套钻孔或切割槽等方法把岩样全部或部分地从孔壁周围岩体中分离开来, 同时监测被解除部位的应变或位移的响应, 然后再根据岩石的本构关系(被解除的应变或位移与围岩远场应力之间的关系)来确定原位地应力。在采用应力解除法测定原位地应力时, 测量结果的好坏关键取决于以下几个方面^[16]: 建立尽可能合理的岩石本构关系, 即应力与应变或位移的关系; 能够较准确地确定岩样的力学性质; 要有足够灵敏的测试仪器以精确测定岩样因局部扰动引起的微小应变值或位移值。以下仅就套芯应力解除法和孔壁切槽应力解除法等比较典型的钻孔应力解除法测量原理做简单介绍。

3.2.1 套芯应力解除法

套芯应力解除法是发展时间最长, 技术上相对比较成熟的一种地应力测量方法, 它可以在 1 个单孔、2 个或 3 个非平行钻孔中确定测点的全应力状态^[7]。套芯应力解除法测量步骤示意图如图 2^[26]所示。根据测量原理和被测物理量与测量部位的不同, 套芯应力解除法又可分为钻孔孔径变形测量法、钻孔孔壁应变测量法和钻孔孔底应变测量法。



(a) 钻套芯大孔 (b) 钻测量小孔 (c) 安装测量探头 (d) 套钻岩芯

图2 套芯应力解除法测量步骤示意图^[26]

Fig.2 Sketch of measure process of overcoring technique^[26]

(1) 钻孔孔径变形测量法

钻孔孔径变形测量法是通过测量应力解除过程中钻孔直径的变化，并由此计算垂直于钻孔轴线平面内的应力状态。利用该方法，可以靠通过对3个互不平行钻孔的应力测量来确定测点的三维地应力状态。钻孔孔径变形测量仪器中最典型的测试仪器是美国矿务局的 USBM 孔径变形计，其结构示意图如图3所示。有关 USBM 孔径变形计的技术细节、应力测量的原理和步骤可以参阅蔡美峰等^[7, 16]的研究。USBM 孔径变形计一般可用于孔深 10~50 m 的钻孔，虽然改进型的 USBM 孔径变形计最大设计测量深度达 1 000 m^[18]，但由于高地应力引起的岩芯饼化现象比较严重，其实际试验孔深只有 120 m。利用此类方法来测定地应力时，测量过程中对岩芯质量的要求较高，完整岩芯长度至少要 300 mm 以上，岩芯一旦受到损坏或断裂就会直接导致测量失败。

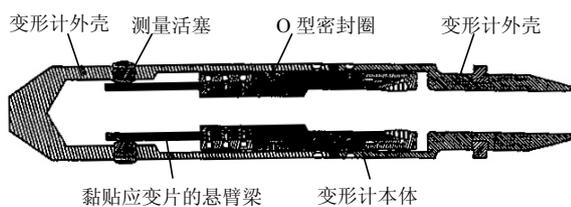


图3 USBM 孔径变形计结构示意图

Fig.3 Sketch of USBM borehole deformation gauge

中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 36-2 型钻孔变形计本质上是对 USBM 孔径变形计的改进。此仪器的钻孔变形测量传感器采用的应变计是全桥电路的钢环，这样对测量精度和稳定性有很大改进，图4为 36-2 型钻孔变形计结构示意图^[27]。

(2) 钻孔孔壁应变测量法

如果在无限大岩体中存在一钻孔，在远场应力作用下，钻孔孔周附近岩石的应力状态可以由弹性力学理论给出理论解，据此可以确定远场应力与钻

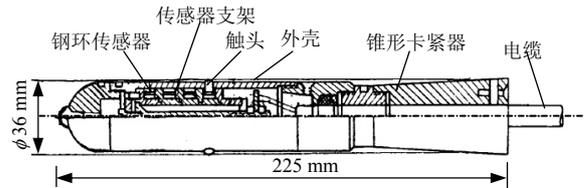
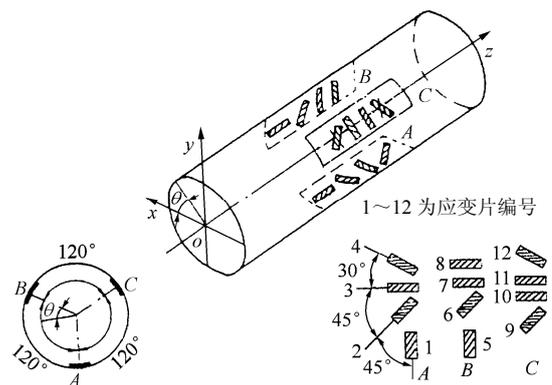


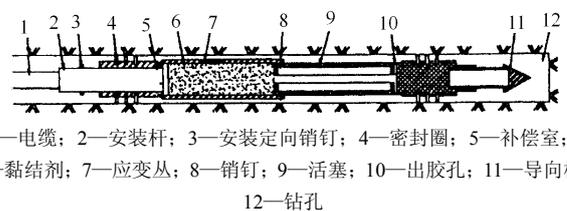
图4 36-2 型钻孔变形计结构示意图^[27]

Fig.4 Sketch of type 36-2 borehole deformer^[27]

孔孔壁上任意一点应变之间的定量关系。只要通过套芯应力解除测得孔壁上若干点的应变，就可以由此推断出测点的三维地应力状态。CSIR 三轴应变计以及压磁应力计等地应力测量仪器都是根据这一原理研制出来的。图5为长江科学院根据澳大利亚 CSIRO 应变计进行改进后研制的 CKX-97 型空心包体式钻孔三向应变计结构示意图^[8]。测量过程中，要先钻测量大孔，然后钻同心的测量小孔(也称先导孔)，最后再沿测量大孔进行套芯钻进进行应力解除。与钻孔孔径变形测量法一样，在实施测量的过程中，对岩芯质量的要求较高，而且完整岩芯长度须大于 300 mm。



(a) 应变片布置示意图



(b) 三向应变计结构图

图5 CKX-97 型空心包体式钻孔三向应变计结构示意图^[8]

Fig.5 Sketch of CKX-97 borehole 3D strain gauge with hollow inclusion^[8]

(3) 钻孔孔底应变测量法

钻孔孔底应变测量法是先先将应变测量装置安放到经过特殊处理过的测量钻孔底部，然后再进行取芯作业以实现应力解除，从而确定测点的地应力状态。南非科学与工业研究委员会研制的门塞式孔底

应变计(CSIR Doorstopper cell)就是典型的钻孔孔底应变测量法的一种, 图 6 为 CSIR 门塞式应变计示意图^[16-28]。图 7 给出了 CSIR 门塞式应变计应力测量的基本步骤^[18]: 首先将 CSIR 门塞式应变计黏贴到被磨光平整处理后的钻孔底部, 然后进行取芯钻进实现应力解除, 同时记录应力解除前后的应变变化量。由于孔底应力集中的存在, 不可避免地会影响到这种方法的测试精度。不过, 在利用该方法进行应力测量时, 无需钻先导孔, 而且钻取的完整岩芯也不需很长(如 5 cm 长的岩芯), 这是其优点所在, 从而使其有可能在较碎的岩石条件下得到应用^[18]。

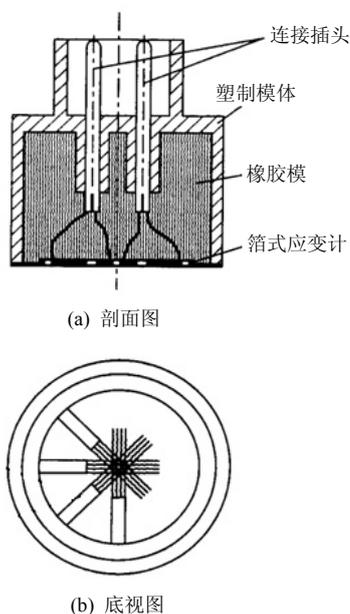


图 6 CSIR 门塞式应变计示意图^[16-28]
Fig.6 Sketch of CSIR Doorstopper cell^[16-28]

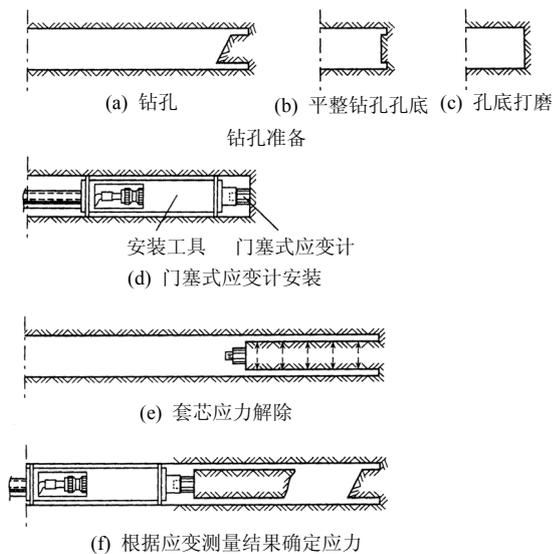


图 7 CSIR 门塞式应变计应力测量步骤^[18]
Fig.7 Measure steps of CSIR Doorstopper cell^[18]

3.2.2 孔壁切槽解除法(borehole slotter)

钻孔孔壁切槽解除法(borehole slotter)是 H. Bock 等^[29-30]提出的一种局部应力解除法, 只能实现对测点的部分应力解除。它是用气动锯片沿钻孔平面的径向方向在孔壁上切出相间 120°的 3 个槽, 槽宽约 1 mm, 切深 25 mm, 这样使孔壁上的切向应力得到释放, 切向应力释放会引起钻孔孔壁表面的应变发生变化, 并利用应变传感器记录下来, 然后再根据应力 - 应变关系来确定测点的应力状态。钻孔切槽法的优点是不需套芯, 而且测量的效率也比较高, 但它只能用于深度比较浅(不超过 30 m)的干钻孔中^[16]。

3.2.3 千斤顶法(jacking methods)

千斤顶法是一种直接测量法, 有时也被称为“应力补偿方法”^[16], 其中应用最广泛的是扁千斤顶法(flat jacking method)。扁千斤顶法最初主要是在土木工程领域用作应力监测^[7], 在 20 世纪 50~60 年代才被普遍应用于岩体应力测量。它的主要缺点^[7, 16]是: (1) 在测量过程中, 一个扁槽的测量只能确定测点处垂直于扁千斤顶方向的应力分量, 因此要确定测点的 6 个应力分量就必须在测点上沿不同方向切割 6 个扁槽, 这样可能会使扁槽之间相互干扰而使得测量的结果失去意义; (2) 仅局限于地下巷道、峒室表面的应力测量, 且受开挖扰动影响较大; (3) 测试结果受测量时的环境条件影响较大。因而在一定程度上限制了它在实际工程中的应用。

3.2.4 应变恢复法(strain recovery methods)

应变恢复法包括非弹性应变恢复法(anelastic strain recovery, ASR)和差应变曲线分析法(differential strain curve analysis, DSCA)。非弹性应变恢复法测定原位应力的原理是 B. Voight^[31]在 1968 年提出的, 直到 1982 年才由 L. W. Teufel^[32]将其应用于原位应力的测定。ASR 法是把岩石看作一种黏弹性材料, 当岩芯从岩体中分离出来并经过一段时间之后, 岩芯会由于应力释放而发生非弹性应变恢复, 根据测得的这部分非弹性应变, 在一定的条件下以确定原位应力。ASR 法最初只能用于确定测点的平面应力状态。

差应变曲线分析法是由 F. G. Strickland 和 N. K. Ren^[33]在 20 世纪 80 年代初期提出的。DSCA 法是基于对岩样再加载条件的应变行为反映了岩样过去的应力历史这一原理而提出的^[16]。当岩芯从钻孔中取出之后会因为应力释放而出现微裂隙的张开和扩展, 裂隙的分布和原岩应力的方向有关, 裂隙的数

量和强度与原岩应力大小成正比。通过对岩芯施加静液压作用，微裂隙会重新闭合，同时记录因微裂隙闭合而产生的应变，从而进一步确定原位应力。DSCA 法的优点是可用于较深部位的地应力估测，已被应用于一些深孔地应力测量研究中^[34-35]。

3.2.5 钻孔崩落法和钻进诱发张裂缝法

钻孔崩落法(borehole breakout method)和钻进诱发张裂缝法(drilling induced tensile fracture method)都可用于确定最大原位水平地应力 σ_H 的方位及其量值，而且已在科学钻探孔的地壳应力研究中得到了成功应用^[3, 22]。

钻孔崩落是指孔壁岩石在高压缩应力作用下发生破坏脱落掉块的现象，如图 8^[18]所示。孔壁崩落破坏的机制可分为 2 类^[3]：(1) 孔壁岩石受高切向应力作用而产生的压剪破坏；(2) 孔壁岩石所受切向应力较高，而孔内钻井液压力又不足以起到支撑护壁的作用，从而引起孔壁出现坍塌掉块。钻孔崩落的识别和分析不仅可以测定原位应力方位和大小，还可识别天然裂缝和诱发裂缝方位。采用钻孔崩落法确定水平地应力主要应用于石油勘探开发、油藏工程、钻井力学及油井井眼稳定性分析、地壳应力评价等领域。

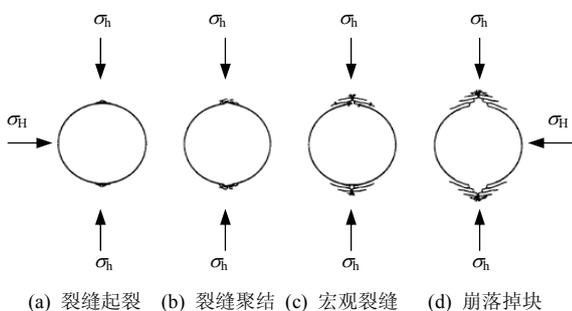


图 8 钻孔崩落示意图^[18]

Fig.8 Sketch of development of borehole breakouts^[18]

钻进诱发张裂缝也是因钻孔孔壁失稳而发生破坏的一种现象，但其发生的机制却与钻孔崩落法不同。在实际钻进作业中，由钻进过程引起的可能会导致孔壁岩石出现张应力的因素，如热应力、钻进作业引起孔内压力激增等，都会在孔周产生均匀分布的附加应力，虽然它们不会影响裂缝的方位，但会降低孔壁岩石的切向应力值，当孔壁岩石的切向应力值降低至某一值并呈现拉伸状态时就可能引起孔壁失稳破坏而形成张裂缝^[3]。诱发张裂缝的方位可以采用井下电视(BHTV)、地层微扫描(FMS)及地

层微摄像(FMI)等测井技术观测到。在德国大陆科学钻探计划(KTB)及位于法国的欧洲地热研究计划的科学钻探井中都观测到了钻进诱发张裂缝现象。

3.2.6 声发射法

声发射法(acoustic emission method)^[7-8, 23]，又称凯塞效应法(Kaiser's effect method)，它是基于岩石材料的凯塞效应来测定岩体地应力的一种方法。声发射是指材料在受到外载荷作用时，其内部储存的应变能快速释放产生弹性波，并发生声响的现象。在 20 世纪 50 年代，德国学者 J. Kaiser^[36]发现，受单向拉伸作用的金属材料在应力未达到材料所受的最大先期应力时，不会出现明显的声发射现象，当应力达到或超过历史上所受的最大值之后，声发射速率明显增加，这种现象后来被称为 Kaiser 效应。从很少产生声发射到大量产生声发射的转折点称为 Kaiser 点，Kaiser 点所对应的应力即为材料在历史上受到的最大应力。R. E. Goodman^[37]在 20 世纪 60 年代初通过试验验证了岩石材料也具有 Kaiser 效应，从而为应用这一技术测定岩石应力奠定了基础。根据 Kaiser 效应，如果把从原岩中取回的定向岩芯制成岩石试件，通过对加工好的取自不同方向的岩石试件进行加载声发射试验，并测定 Kaiser 点，即可找出每个岩石试件先前曾受到的最大应力值，进而可以求出取样点的应力状态。实际上，基于岩石材料的声发射效应测得的只是岩体在历史上所受的最大应力值，但在测定现今地应力方面就显得无能为力，因而只能作为应力测量的一种辅助手段^[9]。

除了上述地应力测量方法以外，还有断层滑移资料分析、地震震源机制解，以及声波观测法、超声波法、原子磁性共振法、放射性同位素法等地球物理探测方法，这些方法的重要性在于探测大范围内的地壳应力状态，但还不能够为目前的工程建设提供可靠的地应力数据资料^[7]。

4 地应力场模拟方法研究

岩体内部的应力主要来自岩体自重、地质构造运动、地形势、剥蚀作用等，其中岩体自重应力场与地质构造运动应力场是现今岩体内部应力场的主要组成部分。地应力场是地质力学与岩体力学研究的基本内容之一，无论是地面工程或地下工程，工程构筑区域的稳定性以及构筑物本身的稳定性都会

直接受到地应力场的影响。现场实测地应力是提供地应力场最直接的途径,但在工程现场由于场地和经费限制等原因,往往只能选择在工程的关键部位和有地质代表性的部位布置有限的地应力测点。另一方面,由于地应力场成因复杂,影响因素众多,各测点的测量成果在很大程度上也只能反映测点附近的局部应力特征。此外,测量成果受到测量误差的影响,使得地应力测量成果出现一定程度的离散性。因此,必须根据地质调查结果和施工区域关键部位的地应力实测数据,进行地应力场的分析拟合计算,这对岩体工程问题十分重要。不仅要反演出比较合理的工程区域地应力场供工程分析之用,还必须尽可能保证应力分析拟合值与关键点的应力实测值一致。

据笔者回忆,早在1979年左右潘家铮院士就呼吁岩石力学界要重视地应力场拟合问题,陈宗基院士对此问题也是一直非常关心的。丰定祥等^[38]在1982年就开始地应力场拟合问题的研究,20世纪八、九十年代,地应力场拟合计算问题在我国形成一个高潮。

总的来说,初始地应力场的拟合计算方法大致有以下几种:(1)岩体自重应力场就是岩体初始应力场;(2)海姆法则(类似于静水压力假设);(3)侧压力系数法,即垂直分量为自重应力,水平应力分量等于 $k\gamma H$ (k 为侧压力系数);(4)边界荷载调整法,不断调整边界荷载的分布规律,使得观测点处的计算值与实测值总体误差最小,这种可能的荷载组合就可以近似地表示该区域的地应力场;(5)有限元数学模型回归分析,假设地应力场初始应力等于自重应力和构造应力的线性组合,由此建立两者之间回归方程,根据测得的地应力资料,用统计分析方法使残差平方和最小;(6)地应力函数的趋势分析法,即位移函数分析法和应力函数分析法。

在上述这些方法中,前3种方法仅适合于中小型工程,是对初始地应力场的一种简化。对于地应力函数的趋势分析方法,由于其假设区域岩土体位移场连续或者应力场连续,这有悖于岩土体非均匀、非连续的性质,比如:在软弱岩土层界面处存在应力不连续,在区域断层处出现位移不连续等。目前在工程中,运用较多的是用有限元数学模型回归分析初始地应力场^[39],即假设地应力场初始应力等

于自重应力和构造应力的线性组合,由此建立两者之间的回归方程,根据测得的地应力资料,用统计分析方法使残差平方和最小,由于该方法运用数学回归思想,工程实践证明该方法具有一定的合理性。

葛修润^[40]在某水电站工程区地应力场反演分析中,研究了一种基于区域构造应变的回归分析方法:工程区域往往受控于一个较大的构造场,表现为该区域内的主应力方向除个别受局部影响较大外,其余大体一致,各点的3个主应力方向相差不大,可以认为该区域的边界处构造运动相对均匀,而构造运动可以通过应变的形式表现出来,这样就可以以构造应变为未知量,利用最优化方法来实现地应力场的反演。研究表明,与工程中常用的边界应力回归分析方法相比,采用基于区域构造应变方法的反演结果与地应力实测值无论是主应力值还是主应力方向都优于应力回归分析方法。

在地应力场拟合计算方面应该注意如下几点:

(1)自重应力场与构造应力场应该分别拟合后再叠加;(2)在自重应力场和构造应力场模拟计算中,应纳入关系密切的断层和重大的非连续面;(3)地表岩层的应力模拟应力求符合地形地貌特征。

陈宗基院士生前一直很关注二滩水电站岩体应力场研究,在此,引用一个例子概述如下:中国科学院武汉岩土力学研究所除了收集前人已做过的地应力实测资料外,还在雅砻江江底岩石进行了地应力实测^[41],得到图9所示的实测主应力分布图^[41-42]。初始应力场模型采用三角形荷载模拟外围应力场,同时考虑自重作用。通过选取不同的侧压力系数 k 进行试算,并将结果与实测数据进行对比,经过多次调整后,当 $k=1.1$ 时得到较为理想的结果,其有限元网格如图10所示,图中的数字表示节点编号。计算值与实测值的对比见表1。

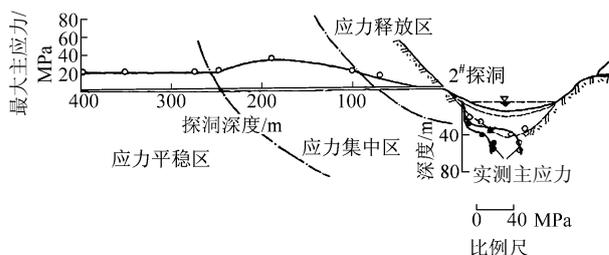


图9 二滩水电站实测主应力分布图^[41-42]

Fig.9 Distributions of principal stresses in Ertan hydropower station^[41-42]

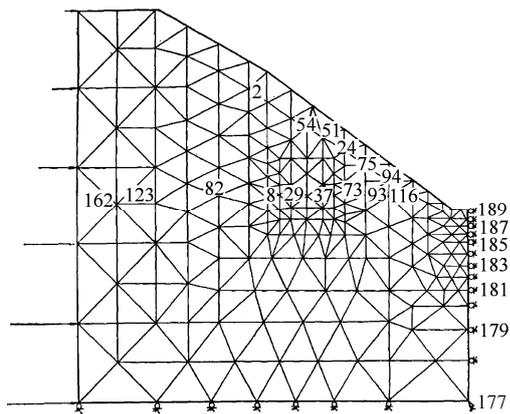


图 10 模拟初始地应力场计算简图

Fig.10 Meshes for fitting on initial in-situ stresses field by finite element method

表 1 计算值与实测值对比

Table 1 Comparison of calculating results obtained from finite element method and measure values

计算值			实测值				
节点编号	σ_1/MPa	σ_2/MPa	$\beta(^{\circ})$	测点编号	σ_1/MPa	σ_2/MPa	$\beta(^{\circ})$
24	13.5	2.4	33	6	9.6	4.3	31
21	19.8	2.9	25	5	19.5	5.7	57
93	24.2	3.0	25	1	24.9	2.9	31
157	65.7	6.1	7	10	65.9	-	-

5 BWSRM 三维地应力测量新原理研究

如前所述，地应力测量，特别是三维地应力测量方面存在不足和局限性，这反映在水力压裂法方面是其一个主应力方向必需与钻孔轴线重合，从而使其测量结果的合理性存在疑问。而套钻解除法很难在深孔中实施。因此，研究一种在理论上可用于深钻孔，同时又不存在水力压裂法假定的新的三维地应力测量方法是岩石力学界的迫切需要。

以笔者为首的科研团队近年来一直致力于一种新的三维地应力测量方法——钻孔局部壁面应力解除法(BWSRM)的研究。BWSRM 是利用侧壁取芯技术，在测点附近几个局部壁面上直接钻取圆柱状岩芯，使其与周围岩体完全分离取代了沿钻孔轴向套取岩芯的传统方法，其在应力解除过程中要求钻取的完整岩芯较短(3~4 cm)，从而有可能大大降低测量过程中断芯等现象的发生，同时也摒弃了水力压裂法必须假定地应力张量的一个主方向与钻孔轴线方向一致的前提条件，从而使 BWSRM 有可能为三

维地应力测量提供一条新的技术途径。

5.1 BWSRM 地应力测量原理

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在一定程度上都受总体地应力场的制约。只要正确把握测量点应力状态与全局地应力场的关系，那么从一定数量测量点的地应力状态信息来推导出这些点所在区域地应力场的 3 个主应力量级和方向是完全可能的。在钻孔孔壁的任何局部壁面上同样也隐含着区域地应力场的信息，实际上，钻孔应力解除法就是基于这一事实，由多个局部测点的地应力状态信息进一步推断区域地应力场的分布特征。

BWSRM 是利用侧壁取芯技术，在测点附近几个局部壁面上钻取岩芯，使其与周围岩体完全分离取代了沿钻孔轴向套取岩芯的传统方法。这种方法只需在同一钻孔中的一个很小区段内(比如长度不大于 1 m 的一小段钻孔)对孔壁上邻近的几个局部壁面进行应力解除，并测量所解除的钻孔孔壁部位上各个方向的正应变，并把这些独立的正应变测量值组合起来加以分析，然后再根据岩石材料卸载时的本构方程以及钻孔孔壁应变与围岩远场应力之间的关系，推导出钻孔周围岩体地应力场的 3 个主应力的量级与方向，从而也就确定了测量点的地应力状态。这里所说的邻近几个局部壁面是指相距不远且不在同一方位的壁面，这是为了保证所解除的小范围内的几个局部壁面的岩性和初始地应力场的特征不会有很大变化，或者说它们具有同一性。因此，可以将测读出的这几个局部壁面的应变组合在一起来分析，从而推导出钻孔周围岩体(理论上为无穷远)的地应力状态。

由于钻孔侧壁上某点任意方向的正应变与钻孔围岩远场应力之间存在着基本数学关系，一个很自然的想法是：如果在钻孔孔壁上任意点沿径向方向实施取芯钻进，使钻取的岩芯与钻孔围岩分离，那么，只要钻取的深度足够长，就可以实现对该点的完全应力解除。如图 11 所示，如果沿钻孔径向对孔壁侧壁上某点实施取芯钻进进行环形切割，即对岩体内这一小区域进行卸载，使其与周围岩体分离，从而实现对该局部壁面的应力解除。根据室内岩石试件的加、卸载曲线，这一卸载过程可以近似看作弹性过程，这样，在实施应力解除前，事先在被解除的局部壁面上黏贴电阻应变计(花)以便记录下

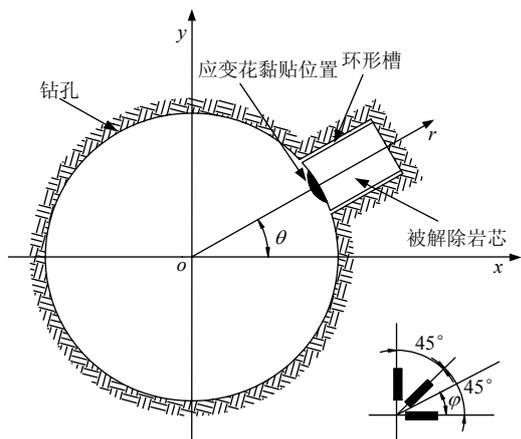


图 11 取芯钻进环形切割应力解除示意图

Fig.11 Sketch of stress relieved by side-wall core drilling

解除前后的应变变化，当应力解除结束后，即可获得一组正应变。采用同样的方法，只要在一小段钻孔段的几个邻近孔壁上连续获得不少于 6 个独立方向的正应变，然后通过最小二乘法可以得到 6 个地应力张量分量，也即确定了测点的地应力状态。

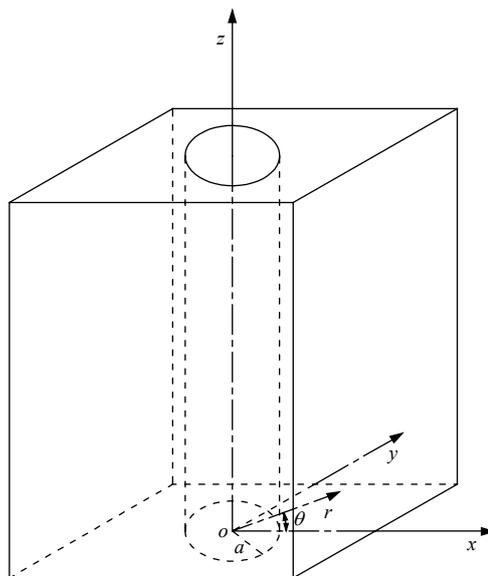
5.2 BWSRM 地应力测量基本理论

在阐述 BWSRM 测量和计算岩体三维地应力状态之前，有必要先对钻孔孔壁壁面上的应力 - 应变关系作一分析。仍然采用线弹性岩石力学理论来简化地应力计算的力学模型，且认为这种简化对于工程应用是合理、适宜的。

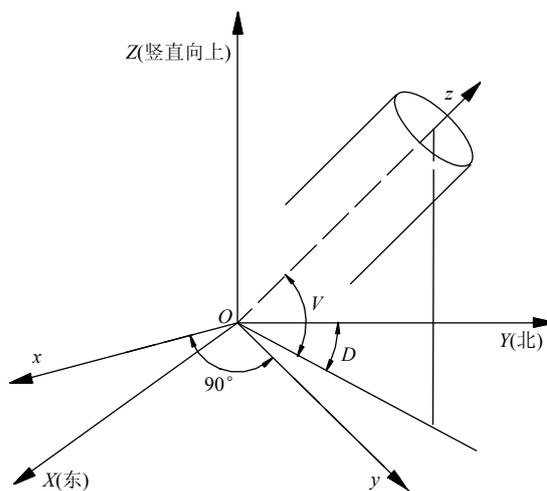
5.2.1 测量钻孔坐标系定义

将岩体视为有初始地应力作用的均质线弹性各向同性体，假想在无限大岩体中有一钻孔，取远离孔口与孔底影响区之外的一小段进行钻孔，定义钻孔直角坐标系 $oxyz$ 如下： z 轴与钻孔轴线一致， x ， y 轴位于与 z 轴垂直的平面内，如图 12(a)所示。定义对应于钻孔直角坐标系 $oxyz$ 的圆柱坐标系为 $or\theta z$ ， r 为径向坐标， θ 为矢径 \vec{r} 与 x 轴正向的夹角， a 为钻孔半径。钻孔在大地坐标系 $OXYZ$ 中的相对位置如图 12(b)所示， 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 $OXYZ$ 系中的方位角为 D ，倾角为 V 。钻孔直角坐标系的坐标轴与大地坐标系的方向余弦可以表示如下：

$$\left. \begin{aligned} l_x &= \cos D, & m_x &= -\sin D, & n_x &= 0 \\ l_y &= \sin V \sin D, & m_y &= \sin V \cos D, & n_y &= -\cos V \\ l_z &= \cos V \sin D, & m_z &= \cos V \cos D, & n_z &= \sin V \end{aligned} \right\} (1)$$



(a) 钻孔坐标系



(b) 大地坐标系

图 12 钻孔坐标系与大地坐标系

Fig.12 Borehole coordinates system around drilled borehole and global coordinates system

5.2.2 钻孔直角坐标系下钻孔孔壁上的应力和应变分量的矩阵表示

若记钻孔直角坐标系下作用在钻孔围岩的远场地应力分量的矩阵形式为

$$[\sigma_0]_{xyz}^T = [\sigma_{x0} \quad \sigma_{y0} \quad \sigma_{z0} \quad \tau_{yz0} \quad \tau_{xz0} \quad \tau_{xy0}] (2)$$

钻孔孔边的应力分量矩阵为

$$[\sigma]_{xyz}^T = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{yz} \quad \tau_{xz} \quad \tau_{xy}] (3)$$

那么，在三维地应力场作用下，钻孔孔边的应力分量可用矩阵形式^[16]表达为

$$[\sigma]_{xyz} = [F][\sigma_0]_{xyz} (4)$$

式中： $[F]$ 为一个 6×6 阶的矩阵，其元素 f_{ij} ($i, j =$

1~6)的表达式分别为

$$f_{11} = -\cos^4\theta + 2\sin^4\theta - 3\sin^2\theta\cos^2\theta + 1 \quad (5a)$$

$$f_{12} = -\sin^4\theta + 3\sin^2\theta\cos^2\theta \quad (5b)$$

$$f_{13} = f_{14} = f_{15} = 0 \quad (5c)$$

$$f_{16} = -8\sin^3\theta\cos\theta \quad (5d)$$

$$f_{21} = 3\sin^2\theta\cos^2\theta - \cos^4\theta \quad (5e)$$

$$f_{22} = -\sin^4\theta + 2\cos^4\theta - 3\sin^2\theta\cos^2\theta + 1 \quad (5f)$$

$$f_{23} = f_{24} = f_{25} = 0 \quad (5g)$$

$$f_{26} = -8\sin\theta\cos^3\theta \quad (5h)$$

$$f_{31} = -2\nu\cos 2\theta \quad (5i)$$

$$f_{32} = 2\nu\cos 2\theta \quad (5j)$$

$$f_{33} = 1 \quad f_{34} = f_{35} = 0 \quad (5k)$$

$$f_{36} = -4\nu\sin 2\theta \quad (5l)$$

$$f_{41} = f_{42} = f_{43} = f_{46} = 0 \quad (5m)$$

$$f_{44} = \cos 2\theta + 1 \quad (5n)$$

$$f_{45} = f_{54} = -\sin 2\theta \quad (5o)$$

$$f_{51} = f_{52} = f_{53} = f_{56} = 0 \quad (5p)$$

$$f_{55} = -\cos 2\theta + 1 \quad (5q)$$

$$f_{61} = -3\sin^3\theta\cos\theta + \sin\theta\cos^3\theta \quad (5r)$$

$$f_{62} = \cos\theta\sin^3\theta - 3\sin\theta\cos^3\theta \quad (5s)$$

$$f_{63} = f_{64} = f_{65} = 0 \quad (5t)$$

$$f_{66} = -\sin^4\theta - \cos^4\theta + 6\sin^2\theta\cos^2\theta + 1 \quad (5u)$$

5.2.3 钻孔直角坐标系下钻孔孔边应变的矩阵表示

如果用 $[\varepsilon]_{xyz}^T = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{yz} \ \gamma_{xz} \ \gamma_{xy}]$ 表示钻孔直角坐标系下的钻孔孔边应变分量矩阵, 根据胡克定律, 则有

$$[\varepsilon]_{xyz} = [C][\sigma]_{xyz} \quad (6)$$

式中: $[C]$ 为各向同性线弹性岩体的本构矩阵, 可以表示为如下形式:

$$[C] = \frac{1}{E} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (7)$$

5.2.4 钻孔圆柱坐标系下钻孔孔边应变的矩阵表示

如果用 $[\varepsilon]_{r\theta z}^T = [\varepsilon_r \ \varepsilon_\theta \ \varepsilon_z \ \gamma_{\theta z} \ \gamma_{rz} \ \gamma_{r\theta}]$ 表示钻孔圆柱坐标系下的孔边应变分量矩阵, 那么它与 $[\varepsilon]_{xyz}^T$ 二者之间的关系可以表示为

$$[\varepsilon]_{r\theta z} = [T_{r\theta z}][\varepsilon]_{xyz} \quad (8)$$

式中: $[T_{r\theta z}]$ 为一个 6×6 阶应变变换矩阵, 其表达式为

$$[T_{r\theta z}] = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 0 & 0 & 0 & \frac{\sin 2\theta}{2} \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 0 & 0 & 0 & -\frac{\sin 2\theta}{2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ -\sin 2\theta & \sin 2\theta & 0 & 0 & 0 & \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

5.2.5 钻孔孔壁上某点正应变与钻孔坐标系下远场应力分量之间的关系

如图 13 所示, 钻孔孔壁上某一方向的正应变表达式为

$$\varepsilon_{\varphi_i} = \varepsilon_\theta \cos^2\varphi_i + \varepsilon_z \sin^2\varphi_i + \gamma_{\theta z} \sin\varphi_i \cos\varphi_i = [0 \ \cos^2\varphi_i \ \sin^2\varphi_i \ \sin\varphi_i \cos\varphi_i \ 0 \ 0] \cdot [\varepsilon_r \ \varepsilon_\theta \ \varepsilon_z \ \gamma_{\theta z} \ \gamma_{rz} \ \gamma_{r\theta}]^T \quad (10)$$

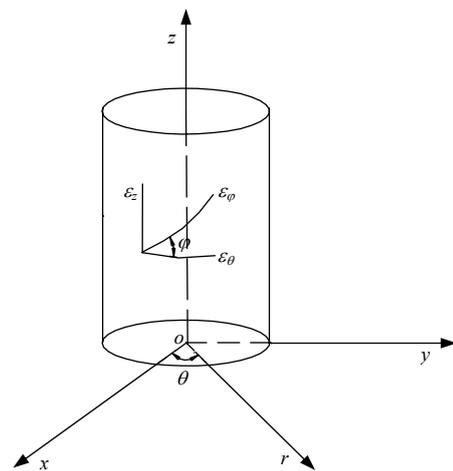


图 13 钻孔孔壁上任意一点的正应变
Fig.13 Normal strains at one point on borehole wall surface

这样, 综合式(4), (6), (8), (9), 岩体为各向同性条件下的孔壁上某一方向的正应变与钻孔坐标系下的远场地应力分量之间的关系可以表达为

$$\varepsilon_{\varphi_i} = [0 \ \cos^2\varphi_i \ \sin^2\varphi_i \ \sin\varphi_i \cos\varphi_i \ 0 \ 0] \cdot$$

$$[T_{r\theta z}][C][F][\sigma_0]_{xyz} \quad (11)$$

5.2.6 钻孔孔壁上某点正应变与钻孔大地坐标系下远场应力分量之间的关系

如果将大地坐标系下的钻孔围岩远场应力分量矩阵表示为

$$[\sigma_0]_{XYZ}^T = [\sigma_{x0} \ \sigma_{y0} \ \sigma_{z0} \ \tau_{yz0} \ \tau_{xz0} \ \tau_{xy0}] \quad (12)$$

那么，大地坐标系下的钻孔围岩远场应力分量矩阵 $[\sigma_0]_{XYZ}$ 与钻孔坐标系下钻孔围岩远场应力分量矩阵 $[\sigma_0]_{xyz}$ 之间的关系式可以表示为

$$[\sigma_0] = [T_\sigma][\sigma_0]_{XYZ} \quad (13)$$

式中： $[T_\sigma]$ 为一个 6×6 阶的应力变换矩阵，其表达式为

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} l_x^2 & m_x^2 & n_x^2 & 2m_x n_x & 2n_x l_x & 2l_x m_x \\ l_y^2 & m_y^2 & n_y^2 & 2m_y n_y & 2n_y l_y & 2l_y m_y \\ l_z^2 & m_z^2 & n_z^2 & 2m_z n_z & 2n_z l_z & 2l_z m_z \\ l_y l_z & m_y m_z & n_y n_z & m_y n_z + m_z n_y & n_y l_z + n_z l_y & l_y m_z + l_z m_y \\ l_z l_x & m_z m_x & n_z n_x & m_x n_z + m_z n_x & n_x l_z + n_z l_x & l_x m_z + l_z m_x \\ l_x l_y & m_x m_y & n_x n_y & m_x n_y + m_y n_x & n_x l_y + n_y l_x & l_x m_y + l_y m_x \end{bmatrix} \quad (14)$$

于是，岩体为各向同性条件下的孔壁上某一方向的正应变与大地坐标系下的远场地应力分量之间的关系可以表达为

$$\varepsilon_{\phi_i} = [0 \ \cos^2 \phi_i \ \sin^2 \phi_i \ \sin \phi_i \cos \phi_i \ 0 \ 0] \cdot [T_{r\theta z}][C][F][T_\sigma][\sigma_0]_{XYZ} \quad (15)$$

5.2.7 钻孔局部壁面应力解除法小结

综上所述，只要在钻孔的某一局部孔段上，对钻孔孔壁上相邻的几个不同位置处的局部壁面实施取芯钻进进行环形切割，实现局部应力解除，记录应力解除前后这几个孔壁上不同方向的正应变变化量，根据钻孔围岩远场应力张量分量和钻孔孔壁上任意一点的正应变之间的基本关系，采用最小二乘法原理^[13]，以及钻孔坐标系与大地坐标系之间的变换关系，就可以推导出钻孔周围岩体的应力张量，进而求得主应力及其量值。需要指出的是，进行应力解除的这几个钻孔孔壁壁面必须相距很近而且不在同一方位，这样做是为了保证所解除的局部壁面岩性和所包含的地应力场信息具有同一性，从而才可以将量测到的几个局部壁面的应变组合起来加以分析，得到测点的地应力状态。正因为通过这种

局部壁面应力解除法可以在同一钻孔内的一小段局部孔段上获得测点的地应力张量(即 6 个应力分量)的全部信息，所以将本节提出的方法称之为钻孔局部壁面应力解除法(borehole wall stress relief method, BWSRM)。

5.3 BWSRM 地应力测量的具体实施

采用 BWSRM 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。在测量钻孔段孔壁选取 3 条平行于钻孔轴线的线，它们与钻孔轴线间的夹角一般在 $110^\circ \sim 130^\circ$ 范围内选择，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。在每个局部壁面上黏贴一个应变花，3 个测量点及应变花布置位置见图 14 所示。

采用壁厚为 2 mm 的外径为 34 mm 的环形钻头对每个局部壁面进行应力全解除，在进行应力全解除的过程中，解除槽深度 h 与被解除的壁面直径 d 有关^[13]。实践证明，当 $h/d = 1.2$ 时，该局部壁面的应力已全部解除。用环形钻头对每个局部壁面进行应力解除时，监测黏贴的应变花的微应变值变化与钻进深度的全过程曲线，根据获得的各应变片在应力解除过程中的应变变化值和钻孔的方位角等参数，将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。三维地应力张量的分析由自行编制的 BWSRM 地应力计算程序完成。但要在钻孔内实施基于 BWSRM 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。

从以上分析不难看出，BWSRM 与以往的套芯应力解除法不同。首先它在实现应力解除的方法上具有创新性，采用侧壁取芯技术，在测点附近几个局部壁面上钻取岩芯使其与周围岩体完全分离，取代了沿钻孔轴向套取岩芯的传统方法。从理论上可以证明，在利用 BWSRM 确定测点地应力时，当所钻取的岩芯直径不超过 3 cm 的条件下，钻取完整岩芯的长度约 4 cm 即可达到完全应力解除。这与套芯应力解除需要钻取不少于 30 cm 长的岩芯相比具有明显的优势，除了可以避免断芯之外，还使得

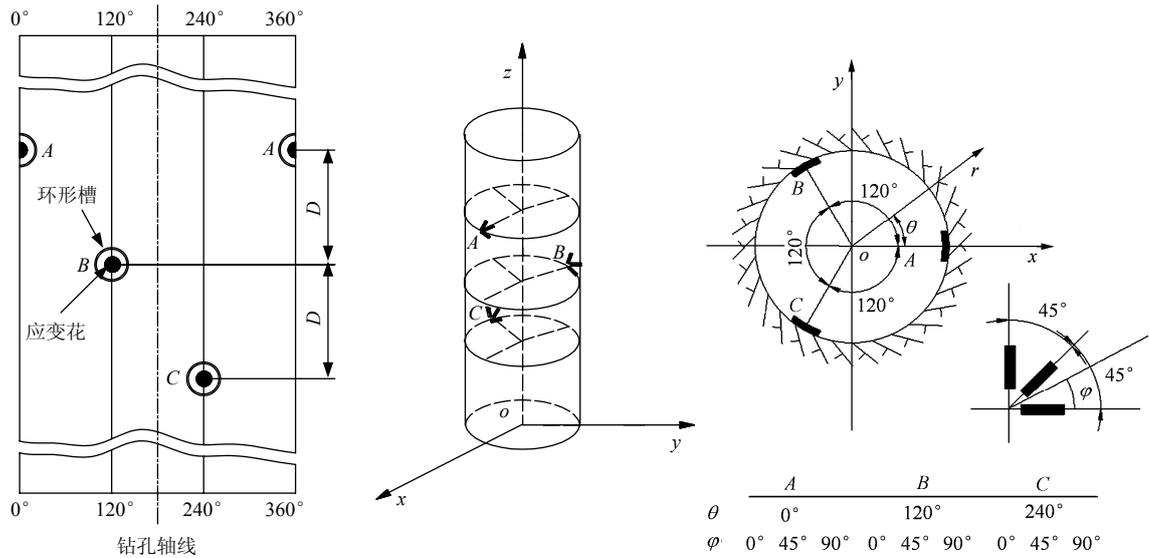


图 14 钻孔测量点及应变花黏贴位置示意图

Fig.14 Sketch for measure points around drilled borehole and arrangement of strain rosettes

BWSRM 有可能在较碎、有岩饼等较差的岩石条件下得到应用。此外，BWSRM 理论上完备，不需要对主应力大小和方向做假定，克服了水力压裂法的重大缺陷，在理论上它也能用于深部钻孔的地应力测量。因此，BWSRM 应该是一种有发展前途的地应力测量方法。

6 基于 BWSRM 的地应力测井机器人研制

6.1 基于 BWSRM 的井下测量系统设计

依据前述的 BWSRM 三维地应力测量原理，如何实施对钻孔孔壁的局部壁面进行侧壁取芯钻进以实现全应力解除并实时监测和记录被解除的应变是关键。为此，提出了研制地应力测井机器人作为实施基于 BWSRM 三维地应力测量的技术思想。在过去的 10 a，笔者通过不断地研究、改进和完善，终于在 2010 年设计并制造出了适用于水平钻孔的地应力测井机器人，并在我国锦屏 II 级水电站科研试验洞内进行了首次试验^[13]。地应力测井机器人的功能主要包括：(1) 对测量钻孔的孔壁质量进行观测，选择测量孔段；(2) 对所选择的测量孔段的局部壁面(工作面)进行打磨、干燥处理；(3) 对工作面进行喷胶、自动黏贴应变片，对工作面进行环

形切割钻进实施应力全解除作业；(4) 实时采集应变测量数据。

图 15 为专门设计的一套室内侧壁取芯钻进试验平台工作原理示意图。利用该试验装置，研究了侧壁取芯钻进基本参数优选问题，确定了钻进钻压、钻头转速、马达功率取值范围，解决了钻进控制模式和钻头冷却方式等技术问题。在此基础上，设计制造了井下应变测量系统。图 16 为地应力测井机器人的总体结构示意图，主要包括提升机构、电子控制电路集成、应变采集仪、上封隔器、下封隔器、应力测量主工作部等主要功能单元。其中，应力测量主工作部由对工作面进行局部处理的打磨组件、自动喷涂胶组件、自动向工作面黏贴应变片的机械手、实施环形切割的钻具等核心和特色部件构成。地应力测井机器人具有窥视孔壁、自动定位、对工作面进行局部打磨处理和风干、自动喷涂胶、自动工作面黏贴应变花、对工作面实施应力解除作业、实时监测和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。整个作业过程由安放在孔口的计算机控制进行。

6.2 BWSRM-H01 型地应力测井机器人简介

机器人设备在钻孔中可以依次完成对局部孔段上 3 个局部壁面的应力解除作业以及获得 9 个不同

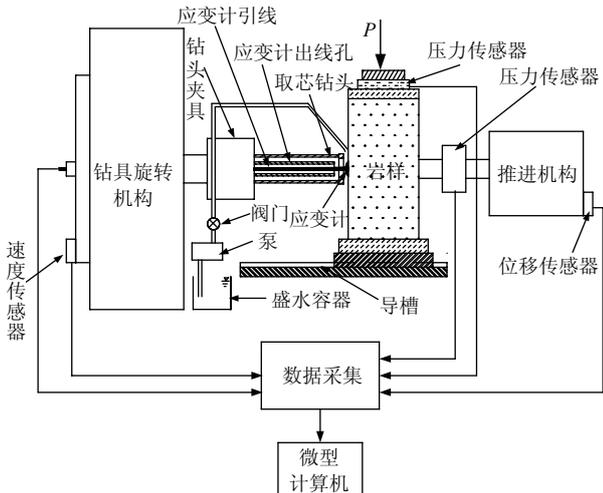


图 15 试验原理示意图

Fig.15 Sketch of testing principle

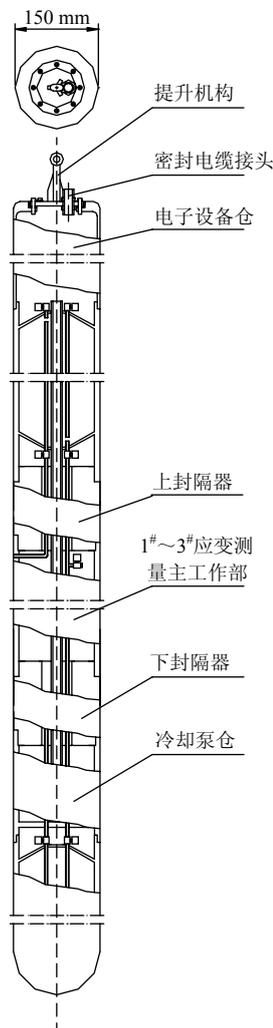


图 16 BWSRM 地应力测井机器人结构示意图

Fig.16 Sketch of geostress measuring instrument with BWSRM

方向的正应变值。由于整个结构的长度尺寸较大，在 2010 年进行首次试验时，考虑到当时锦屏 II 级水电站科研试验洞的情况，对整个测量系统进行了

简化，同时也对结构进行了优化，加工制造了 BWSRM-H01 型地应力测井机器人。BWSRM-H01 型地应力测井机器人严格依据所提出的钻孔局部壁面应力解除法(BWSRM)地应力测量原理和步骤进行工作，唯一区别就是设备中仅安装有 1 个应力测量主工作部，一次应力解除试验只能获得一个钻孔局部壁面上的 3 个不同方向上的正应变值，要获得测点围岩的地应力状态就需要至少 2 次的应力解除试验。但其现场测量的优越性也是显而易见的。

BWSRM-H01 型地应力测井机器人由外连接部、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。其外观呈圆柱形，外径约 148 mm，全长约 720 mm，质量约 21 kg(见图 17)。切割环形槽的钻具动力由功率为 400 W 的特制电机驱动，按照预设的钻进控制模式对花岗岩、大理石等岩石只需 3~4 min 就可完成 40 mm 深度的环形槽切割工作。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。应变片自动黏贴机械手的设计和加工制造是测井机器人的又一特色，内置的自制电阻应变仪具有高精度和高稳定性。

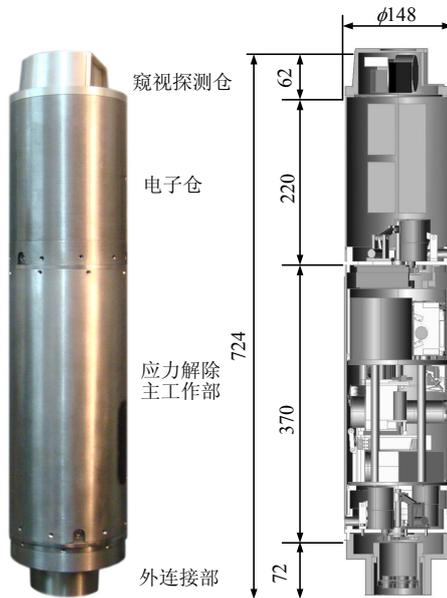


图 17 BWSRM-H01 型地应力测井机器人照片(单位: mm)

Fig.17 Photos of geostress measuring instrument with BWSRM-H01(unit: mm)

6.3 BWSRM-H01 型地应力测井机器人在钻孔中的工作步骤

图 18 为 BWSRM-H01 型地应力测井机器人工作示意图。其主要工作步骤可以概括为以下几点：

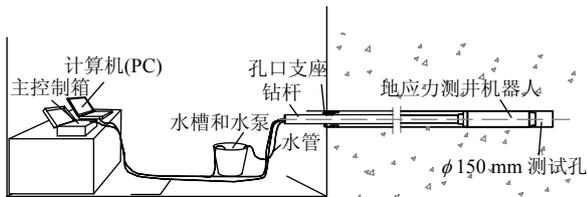


图 18 BWSRM-H01 型地应力测井机器人工作示意图

Fig.18 Sketch of in-situ rock stresses measurement with BWSRM-H01

(1) 选择应力解除点位

① 推送设备至洞口，使设备轴线大致与试验孔轴线平行，探测部处于推送方向的前端。

② 安装推送支架，连接钻杆与设备主体。

③ 解除测点位置筛选。在推送设备过程中，打开探测部的灯光电源，通过摄像系统在计算机屏幕上实时观察孔壁质量状况。当连续观察到局部孔段上无明显的裂隙或小溶洞等地质结构缺陷时，再对该孔段做重点观测。确认该局部孔段的孔壁光滑完整后，可在该孔段选取约 1 m 长的局部孔段作为测量孔段，并将该孔段上的 3 个局部壁面作为应力解除点位。

必要时继续向孔底方向推送设备，以便选择其他适宜进行应力解除的局部孔段。

(2) 实施应力解除作业

选好应力解除点位后，从孔底方向往孔口方向依次对选好的壁面实施应力解除作业。

首先将设备主体推送至要解除的点位附近，使设备的应力解除主工作部位位于工作面位置时，设备锚固定位。启动打磨程序，由打磨机构在选定的工作面上进行局部打磨处理；打磨结束后，关闭打磨程序；启动喷胶和贴片程序，黏贴应变花至工作面，等待 10~15 min 使应变片(花)充分固化；启动冷却水循环系统、应力解除钻进作业和数据采集程序，应力解除作业开始，同时由计算机控制程序实时监测应变花上 3 个应变片所记录的被解除壁面上的应变变化情况。

待钻进和环形解除槽切割正常作业结束后，启动喷涂胶剥离程序，铲刀开始工作直至使应变片(花)与岩芯面剥离或剪断应变片(花)连接线；然后使钻具复位，应力解除作业结束。

(3) 应力解除作业结束后，将设备从钻孔中取出，一次应力解除任务完成。

(4) 在同一局部孔段内，重复上述步骤，完成

对至少 3 个壁面的应力解除作业。

7 在四川锦屏 II 级水电站工程中的初步应用

7.1 锦屏水电站简介

锦屏 II 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)将江水引到下游地下水力发电厂。发电总装机容量为 4 800 MW，共安装 8 台 600 MW 的水轮发电机组^[43]。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、合理地实测地应力值是设计和施工方迫切需要的重要数据，特别是引水洞出口和地下厂房所在区域的锦屏山顶下约 2 400 m 深处的地应力资料更为珍贵。在试验之前，即 2010 年 8 月之前，在该区域曾经尝试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，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。

7.2 锦屏地下 2 430 m 深处科研试验洞布置

基于 BWSRM 地应力现场试验是在锦屏 II 级水电站科研试验洞 2[#]试验支洞(AK 8+850，其断面尺寸为 3 m×2.2 m(宽×高))内的试验支洞 C 内进行的(其断面尺寸为 3 m×2.2 m(宽×高))，试验地点的地层埋深约 2 430 m，属白山组 T₂₆ 地层，岩石为大理岩。图 19 为试验洞所在位置示意图。试验孔均位于试验支洞 C 内，成孔直径为 150 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°。1[#]试验孔位于试验支洞 C 的掌子面，而 2[#]和 3[#]试验孔位于试验支洞 C 的边墙上，两孔轴线平行且相距 5 m，2[#]试验孔孔口距掌子面的距离也为 5 m。

7.3 锦屏地下 2 430 m 深处地应力测量结果

地应力测量试验由测井机器人按照设定的程序进行。1[#]试验孔的试验结果见葛修润和侯明勋^[13]的研究，本文仅对 3[#]试验孔的试验结果做较详细介绍。图 20 为位于边墙上的 3[#]试验孔距孔口 14.3~15.0 m 试验孔段上获得的孔壁上被解除的微应变与解除孔深的关系曲线。地应力测试时，所选取的该段局部孔段壁面光滑、完整，孔壁上无裂缝。地应力分析时所需的卸载弹性模量和泊松比，是由在相应试验

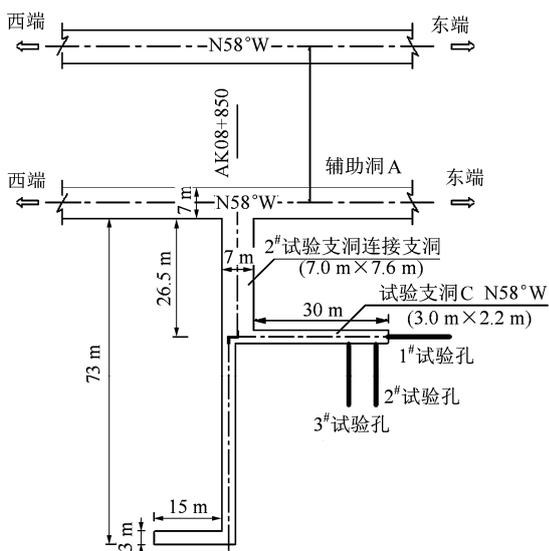


图 19 地应力测试钻孔位置示意图

Fig.19 Sketch of positions of in-situ testing boreholes

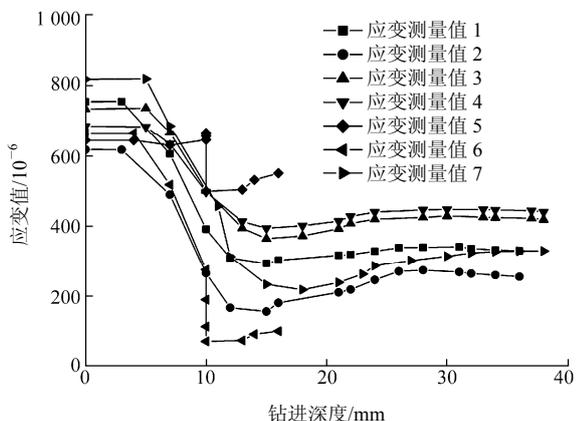


图 20 3#试验孔应力解除过程中微应变值随解除孔深的关系曲线

Fig.20 Curves of micro-strain value vs. relieved annular slot depth in course of stresses relief for testing borehole #3

孔内获得的岩芯加工成标准圆柱形岩样(直径 50 mm, 高度 100 mm), 在室内通过单轴和三轴压缩试验来确定的。用 BWSRM 地应力计算程序分析得出的 1#试验孔(位于试验支洞 C 的掌子面)和 3#试验孔

(位于试验支洞 C 的边墙上)大地坐标系下的三维地应力张量见表 2。边墙上 3#试验孔地应力张量的空间展布状态如图 21 所示, 图中, 各坐标的第一个值为主应力(MPa), 第二个值为方位角(°), 第三个值为倾角(°), 图 22 同。

从图 21 可以看出, 3#孔测点的地应力状态为: 近水平面上的 2 个主应力分别为第一和第二主应力, 其量值分别为 74.58, 54.96 MPa。最接近垂直向的主地应力为最小主应力, 其量值为 39.51 MPa, 远小于用上覆岩层自重估算的值(63 MPa), 它与铅垂线夹 30°左右的角, 方位为 306.4°。图 22 给出了从 3#孔实测的地应力张量和 1#孔实测的地应力张量对照图, 前者用实线表示, 后者用虚线表示。2 个测点的主应力的空间展布状态比较接近, 但有一定差别。边墙上 3#孔测点的最大主应力和中间主应力的方位分别与掌子面上 1#孔测点的最大主应力和中间主应力的方位相差分别为 26.8°和 20.9°左右。3#孔测点的第一主应力量值较 1#孔测点的第一主应力量值大 11.49 MPa, 而 3#孔测点的第二主应力量值较 1#孔测点的第二主应力量值小 2.7 MPa。但 3#孔和 1#孔都显示出各自的第一和第二主应力量值比较接近。3#孔和 1#孔测点的最小主应力量值很接近, 均接近垂直方向, 但其方位和倾角均有差别。

弹性模量的变化对地应力的量级有较大直接影响, 而泊松比的变化主要影响主应力的空间分布。工程区域地应力场的研究往往需要通过对所研究区域内大量地应力实测资料进行综合分析来获得, 也同样需要采用多种不同的测试方法测得的地应力结果予以对比分析和综合评判才能得到比较合理、科学的结论。目前在锦屏水电站工地科研试验洞内所做的基于 BWSRM 原理的地应力测试工作还只是初步的, 但已对所测试的局部范围内的地应力分布特点有了基本的认识和判断, 更进一步的工作有待于今后再寻找合适的洞室或巷道进行更多的试验。

表 2 锦屏 II 级水电站工地埋深 2 430 m 处试验支洞 C 内测点在大地坐标系下的三维地应力张量

Table 2 Principal components of in-situ stress tensor in experimental branch tunnel C of Jinping II hydropower station depth of 2 430 m

试验孔 编号	σ_1			σ_2			σ_3			弹性模量/ GPa	泊松比
	量值/ MPa	方位角/ (°)	倾角/ (°)	量值/ MPa	方位角/ (°)	倾角/ (°)	量值/ MPa	方位角/ (°)	倾角/ (°)		
1#(掌子面)	63.09	125.6	0.5	57.66	215.5	15.2	38.65	37.4	74.8	68.0	0.11
3#(边墙)	74.58	152.4	27.7	54.96	236.4	11.2	39.51	306.4	60.0	78.0	0.11

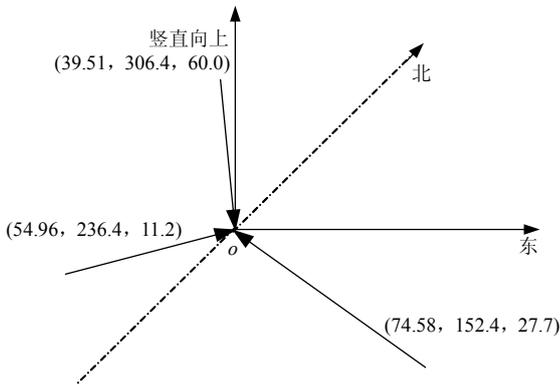


图 21 锦屏 II 级水电站试验支洞 C 内边墙上测点地应力张量的空间方位图

Fig.21 Spatial distributions of principal in-situ stress tensor components for testing borehole #3 in experimental branch tunnel C of Jinping II hydropower station

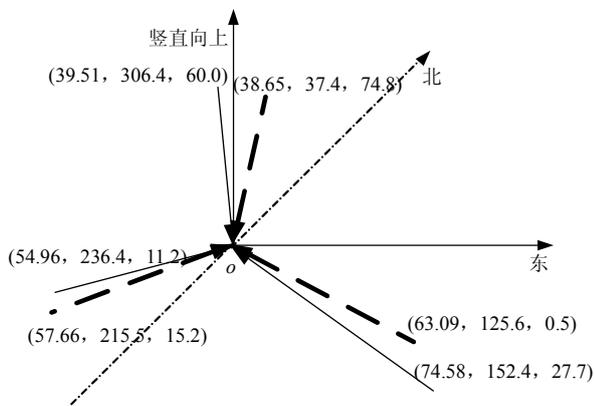


图 22 锦屏 II 级水电站试验支洞 C 内边墙上 3# 试验孔测点地应力张量(实线)和掌子面上 1# 试验孔测点地应力张量(虚线)的空间方位对比图

Fig.22 Comparison between spatial distribution of principal in-situ stress tensor components of testing borehole #3(solid line) and of testing borehole #1(dashed line) in experimental branch tunnel C of Jinping II hydropower station

7.4 地应力测量结果的初步分析

总结 3# 和 1# 试验孔的地应力测量结果可以看出有如下基本规律:

- (1) 2 个试验孔的最小主应力都是比较接近垂直方向, 两者与水平面的夹角分别为 60.0° 和 74.8° ;
- (2) 2 个试验孔的第一主应力和第二主应力的量值都比较高;
- (3) 2 个试验孔各自的第一主应力和第二主应力的量值都比较接近;
- (4) 2 个试验孔的第一主应力的方位角在第二象限;

(5) 2 个试验孔的第二主应力的方位角在第三象限;

(6) 2 个试验孔的第一主应力和第二主应力与水平面的夹角都小于 30° ;

(7) 由于 2 个试验孔的最小主应力仅为其重力估算值的 62% 左右, 由此看来, 该地段地应力受水平向构造应力影响很大。

8 结 论

地应力测量以及对实测地应力数据资料的分析是一项复杂、但很有意义的工作。虽然我国的地应力测量与研究工作经过过去 50 余年的发展已取得了很大的进步, 但仍然任重而道远。

钻孔局部壁面应力解除法(BWSRM)从提出到地应力测井机器人样机问世, 经历了一个艰难的发展过程。经过地应力测井机器人在我国锦屏 II 级水电站工地科研试验洞的几次现场测试, 以及对所获得的地应力实测数据的分析结果分析来看, BWSRM 的地应力测量原理是正确的, 实施 BWSRM 的技术途径也是切实可行和可靠的。笔者认为, 基于 BWSRM 研制的地应力测井机器人是成功和有效的, 而 BWSRM 与测井机器人在今后地应力测井工作中的推广和应用也将会具有较为广阔的前景。

BWSRM 原理同样可以适用于垂直钻孔, 下一步工作将研制出适用于垂直孔的地应力钻孔机器人, 以适应现场工作的需要。

致谢 本项工作曾获得以下资助: (1) 中国科学院基础局 1998 年度科学创新基金; (2) 2001 上海交通大学 985 一期; (3) 2006 年国家自然科学基金面上项目(批准号: 50579037); (4) 2007 年国家自然科学基金“雅砻江水电开发联合研究基金”重点项目(批准号: 50639080); (5) 2010 年国家自然科学基金面上项目(批准号: 50979054)。在此深表感谢!

对二滩水电开发有限责任公司、锦屏水电站管理局、华东勘测设计研究院和锦屏水电站建设工地各位同仁的大力支持, 以及涂光骞和陈文华两位同志在机器人研制和现场试验方案制定方面提供的帮助和支持深表谢意!

参考文献(References):

[1] 黄福明. 地壳应力测量及其在工程中的应用(综述)[J]. 地震, 1990,

- (3): 69 - 80.(HUANG Fuming. Geostress measurement and its applications in engineering(overview)[J]. Earthquake, 1990, (3): 69 - 80.(in Chinese))
- [2] EMMERMANN R, LAUTERJUNG J. The German continental deep drilling program KTB: overview and major results[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B8): 18 179 - 18 201.
- [3] 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]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B8): 453 - 475.
- [4] ZOBACK M D, HARJES H P. Injection-induced earthquakes and crustal stress at 9 km depth at the KTB deep drilling site, Germany[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B8): 18 477 - 18 491.
- [5] 王连捷, 崔军文, 张晓卫, 等. 中国大陆科学钻探主孔现今地应力状态[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2006, 31(4): 505 - 512. (WANG Lianjie, CUI Junwen, ZHANG Xiaowei, et al. In-situ stress state in the main borehole of the Chinese Continental Scientific Drilling[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2006, 31(4): 505 - 512. (in Chinese))
- [6] 李四光. 地质力学概论[M]. 北京: 科学出版社, 1973: 38.(LI Siguang. Introduction to geomechanics[M]. Beijing: Science Press, 1973: 38.(in Chinese))
- [7] 蔡美峰, 乔 兰, 李华斌. 地应力测量原理和技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 1 - 169.(CAI Meifeng, QIAO Lan, LI Huabin. Rock stress measurement principles and techniques[M]. Beijing: Science Press, 1995: 1 - 169.(in Chinese))
- [8] 刘允芳. 岩体地应力与工程建设[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2000: 1 - 215.(LIU Yunfang. Rock stress and engineering construction[M]. Wuhan: Hubei Scientific and Technological Press, 2000: 1 - 215.(in Chinese))
- [9] 葛修润. 大陆科学钻探的意义、现状和未来[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1998.(GE Xiurun. The significance, current situation and future of continental scientific drilling[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1998.(in Chinese))
- [10] 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 3 923 - 3 927.(GE Xiurun, HOU Mingxun. New approach to measure geostress—local bore-hole-wall complete stress relief method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 3 923 - 3 927.(in Chinese))
- [11] 侯明勋. 深部地应力测量新方法新原理及其相关问题研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2004.(HOU Mingxun. Studies on new method and principle of three dimensional crustal stress measurement in deep borehole and related issues[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004.(in Chinese))
- [12] GE X R, HOU M X, WANG S L. A new approach for measuring the in situ 3D rock stress tensor in drilled borehole[C]// LU Ming, LI C C, KJORHOLT H, et al, ed. Proceedings of International Symposium on In-situ Rock Stress. London: Taylor and Francis/ Balkema, 2006: 185 - 192.
- [13] 葛修润, 侯明勋. 钻孔局部壁面应力解除法(BWSRM)的原理及其在锦屏 II 级水电站工程中的初步应用[J]. 中国科学: 技术科学, 2011(待刊).(GE Xiurun, HOU Mingxun. 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[J]. Science China: Technological Sciences, 2011(to be pressed)(in Chinese))
- [14] 王靖涛. 水压致裂法测量地应力的断裂力学方法[J]. 岩土力学, 1982, 3(1): 1 - 12.(WANG Jingtao. Fracture mechanics approach for in-situ stress determination by hydra-fracturing[J]. Rock and Soil Mechanics, 1982, 3(1): 1 - 12.(in Chinese))
- [15] 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)[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(7/8): 1 011 - 1 020.
- [16] AMADEI B, STEPHANSSON O. Rock stress and its measurement[M]. London: Chapman and Hall, 1997: 95 - 476.
- [17] FAIRHURST C. Stress estimation in rock: a brief history and review[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(7/8): 957 - 973.
- [18] LJUNGGRENA C, CHANG Y, JANSON T, et al. An overview of rock stress measurement methods[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(7/8): 975 - 989.
- [19] SJÖBERG J, CHRISTIANSSON R, HUDSON, J A. ISRM suggested methods for rock stress estimation—part 2: overcoring methods[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(7/8): 999 - 1 010.
- [20] 王连捷, 潘立宙, 廖椿庭, 等. 地应力测量及其在工程中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 82 - 147.(WANG Lianjie, PAN Lizhou, LIAO Chunting, et al. Geostress measurement and its application in engineering[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 82 - 147.(in Chinese))
- [21] OIKAWA Y, MATSUNAGA I, YAMAGUCHI T. Differential strain curve analysis to estimate the stress state of the Hijiori hot dry rock field, Japan[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1993, 30(7): 1 023 - 1 026.

- [22] BRUDY M, ZOBACK M D. Drilling-induced tensile wall-fractures: implications for determination of in-situ stress orientation and magnitude[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(2): 191 - 215.
- [23] LAVROV A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(2): 151 - 171.
- [24] HUBBERT M K, WILLIS D G. Mechanics of hydraulic fracturing[C]// *The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers Transactions*. [S.l.]: [s.n.], 1957: 153 - 166.
- [25] SCHEIDEGGER A E. Stresses in earth's crust as determined from hydraulic fracturing data[J]. *Geologic Bauwes*, 1962, 27: 45 - 50.
- [26] GE X R, FENG D X, YANG J L. The elasto-visco-plastic analysis for rock displacement of the foundation pit of a water power plant[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1982, 15(3): 145 - 161.
- [27] 刘继光. 36 - 2 型钻孔变形计的组装工艺及现场使用[J]. *岩土力学*, 1983, 4(1): 59 - 66.(LIU Jiguang. The assembling art and operation in fields of type 36 - 2 borehole deformeters[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1983, 4(1): 59 - 66.(in Chinese))
- [28] 苏恺之. 地应力测量方法[M]. 北京:地震出版社, 1985: 34 - 97.(SU Kaizhi. *Rock stress measuring methods* [M]. Beijing: Seismic Press, 1985: 34 - 97.(in Chinese))
- [29] BOCK H. Measuring in-situ rock stresses by borehole slotting[C]// HUDSON J A ed. *Comprehensive Rock Engineering*. Oxford: Pergamon Press, 1993: 433 - 443.
- [30] CORTHESEY R, GUANG He, GILL D E, et al. A stress calculation model for the 3D borehole slotter[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(3): 493 - 508.
- [31] VOIGHT B. Determination of the virgin state of stress in the vicinity of a borehole from measurements of a partial anelastic strain tensor in drill cores[J]. *Felsmechanik and Ingenieurgeologi*, 1968, (6): 201 - 215.
- [32] TEUFEL L W. Prediction of hydraulic fracture azimuth from anelastic strain recovery measurements of oriented core[C]// *Proceedings of the 23rd U.S. Symposium on Rock Mechanics*. Berkeley: SME/AIME, 1982: 238 - 245.
- [33] STRICKLAND F G, REN N K. Use of differential strain curve analysis in predicting the in-situ stress state for deep wells[C]// *Proceedings of the 21st U. S. Symposium on Rock Mechanics*. Rolla: University of Missouri, 1980: 523 - 532.
- [34] MATSUKI K, TAKEUCHI K. Three-dimensional in situ stress determination by anelastic strain recovery of a rock core[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(7): 1 019 - 1 022.
- [35] LIN W, OIKAWA Y, IMAMURA T, et al. Comparisons between three-dimensional in-situ stresses determined by anelastic strain recovery and differential strain curve analysis methods[C]// *Proceedings of International Symposium on In-situ Rock Stress*. MING L ed. London: Taylor and Francis, 2006: 385 - 391.
- [36] KAISER J. Knowledge and research on noise measurements during the tensile stressing of metals[J]. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*, 1953, 24: 43 - 45 (in German).
- [37] GOODMAN R E. Subaudible noise during compression of rocks[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1963, 74: 487 - 490.
- [38] 丰定祥, 谷先荣, 杨家岭, 等. 关于地下工程有限元分析中初始地应力场的假定[J]. *地下工程*, 1982, (2): 20 - 27.(FENG Dingxiang, GU Xianrong, YANG Jialing, et al. Assumptions on initial stress field in FEM analysis of underground engineering[J]. *Underground Engineering*, 1982, (2): 20 - 27.(in Chinese))
- [39] 郭怀志, 马启超, 薛玺成, 等. 岩体初始地应力场的分析方法[J]. *岩土工程学报*, 1983, 5(3): 64 - 75.(GUO Huaizhi, MA Qichao, XU Xicheng, et al. The analytical method of the initial stress field for rock masses[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1983, 5(3): 64 - 75.(in Chinese))
- [40] 葛修润. 三峡水利枢纽右岸地下厂房洞室群围岩稳定性分析[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008.(GE Xiurun. *Stability analyses of underground powerhouse caverns in right-bank of the Three Gorges Hydropower Station*[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.(in Chinese))
- [41] 白世伟, 李光煜. 二滩水电站坝区岩体应力场研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1982, 1(1): 45 - 56.(BAI Shiwei, LI Guangyu. *Research on stress field around dam area of Ertan hydropower station*[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1982, 1(1): 45 - 56.(in Chinese))
- [42] 孙广忠, 孙毅. 岩体力学原理[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 17 - 30.(SUN Guangzhong, SUN Yi. *Principle of rock mass mechanics*[M]. Beijing: Sciences Press, 2011: 17 - 30.(in Chinese))
- [43] WU S Y, SHEN M B, WANG J. Jinping hydropower project: main technical issues on engineering geology and rock mechanics[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2010, 69(3): 325 - 332.