

井下地震监测的钻井技术

李粮纲¹, 蔡亚先², 张 乾¹, 杨永波¹

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉 430000)

摘要:采用井下地震仪可监测到许多地面地震台未记录到的微弱地震波,可减小地面噪声干扰,大大提高震源定位精度。介绍了武汉甚宽频带数字地震监测 1 井的设计以及钻井和固井的关键技术。在项目实施过程中采用合理的钻井工艺和专门设计的单向注浆装置等技术满足了地震监测井的特殊技术要求。

关键词:井下地震监测;钻井;钻井结构;固井

中图分类号:TE242;P315.7 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2007)10-0025-04

Drilling Technology of Downhole Seismic Monitoring/LI Liang-gang¹, CAI Ya-xian², ZHANG Qian¹, YANG Yong-bo¹
(1. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. China Seismological Bureau Earthquake Institute, Wuhan Hubei 430000, China)

Abstract: Earthquake has great harm to humanity. How can forecast earthquake more effective, timely and accurately is still a scientific research poser. The Downhole seismograph can monitor lots of weak seismic wave that can't be monitored by the ground seismograph. It can decrease the noise interference on the ground and increase the focus positioning accuracy. This paper mainly introduced the design and the key technology of drilling and cementing for the NO. 1 seismic monitoring well in Wuhan. The reasonable drilling technology and the specially designed one-way grouting device are adopted in this project to meet the special technical requirements.

Key words: downhole seismic monitoring; drilling; borehole structure; cementing

0 前言

为了减小地面噪声干扰,提高地震监测精度和仪器放大倍数,采用钻井的方法,将地震监测仪安放到地面 100 m 以下的钻井底部,通过缆线将井下监测到的地震信号传送到数据分析中心。采用这种井下地震监测方法可以取得可靠、连续、完整的地震记录图,准确测定地震基本参数(发震时刻、震级、震中位置、震中距离和震源深度),为预报地震和开展各项研究工作提供基础资料。

在具有高水平脉动干扰且沉积层很厚的大城市及附近地区,井下地震监测是研究微震活动的唯一可行手段。国外研究成果表明利用井下地震仪可监测到许多地面地震台未记录到的微弱地震波,可大大提高震源定位精度。

应用井下地震观测技术可发展地声(或称极微震、超微震)的观测研究。国内外研究地声的首要目的是探索地震前兆。其次,井下地声观测技术也可用于探测地下介质细结构及矿体等。

在监测钻井中还可进行地层形变观测、地应力测量、水位、水温、地温及地下水化学成分测量等多种观测项目。井下地层形变(地倾斜、体应变等)观

测可以摆脱地表的天然及人为干扰,如降雨、交通等等。对深井观测来说,最明显的干扰只剩下固体潮和海洋潮效应,其振幅可达 $1 \sim 2 \times 10^{-7}$ rad(对倾斜仪情况)。但是,这些干扰具有准周期性,很容易通过滤波方法来排除。

因此,综合利用多种井下观测结果,可以提高地震预报的准确度与预报效率。

此外,井下观测的地震波还可应用于石油、地热、地下水等资源的勘探中。由于 P、S 波的传播特性受岩石孔隙度、孔隙密度和液体成分性质等多孔介质特性的影响,故采用井下周期性震源和井下检波器观测系统可望探测出地下介质的细结构和物性。

1 地震监测钻井设计与技术要求

1.1 井孔选址

(1) 避开铁路、公路、厂矿、采石场等振动源和油田开采区或工业采水区;

(2) 避开滑坡和易发生洪涝的地区。

根据干扰源的特性,选取 1~5 km 的避开距离。确因观测布局需要,避开距离可适当放宽,但要达到在深井实地测试时的最大干扰双振幅要求。

收稿日期:2007-04-22

作者简介:李粮纲(1961-),男(汉族),湖南长沙人,中国地质大学(武汉)教授,地质工程专业,博士(后),从事地质工程教学与科研工作,湖北省武汉市鲁磨路, Lilog@cug.edu.cn。

1.2 井孔设计

1.2.1 井孔最佳深度设计

随着深度的增加,干扰幅度减小;同时,由于表层介质的放大作用,也使信号随深度的增加而减小。若干扰和信号随深度的减小都遵从指数规律,即:

$$N_h = N_0 \times 10^{-\lambda_N h}$$

$$S_h = S_0 \times 10^{-\lambda_S h}$$

式中: N_0 、 S_0 ——地面处的干扰和信号; λ_N 、 λ_S ——干扰和信号的衰减系数; N_h 、 S_h ——深度为 h 处的干扰和信号。

两式相比,得:

$$S_h/N_h = (S_0/N_0) \times 10^{(\lambda_N - \lambda_S)h}$$

令 $(S_h/N_h)/(S_0/N_0) = 10$,即令信噪比提高一个量级,由 $\log[(S_h/N_h)/(S_0/N_0)] = 1$,则:

$$h_1 = \frac{1}{\lambda_N - \lambda_S} \log \frac{S_h/N_h}{S_0/N_0} = \frac{1}{\lambda_N - \lambda_S}$$

因干扰比信号随深度衰减得快,即 $\lambda_N > \lambda_S$,故有:

$$h_1 = 1/(\lambda_N - \lambda_S) > 1/\lambda_N = h_{\min}$$

即

$$h_{\min} = 1/\lambda_N$$

这是使信噪比提高一个量级的起始深度。

根据国外一些井下地震台的实际监测结果,在覆盖层较厚的平原地区,一般在井下300~500 m处安放井下仪器,就可得到良好的地震记录;若地层为基岩,则井深100 m已经足够。

1.2.2 井孔垂直度

对于500 m深的井孔,要求顶角 $\geq 3^\circ$ 。

1.2.3 完井与固井

(1)采用直径为146~180 mm无缝钢管做套管,套管的连接采用特殊丝扣连接与焊接,确保套管连接平滑且密封不渗水;

(2)在套管与围岩之间灌注高标号的水泥浆,使套管与围岩固结为一体;

(3)井底介质应为基岩或粘土层,并采用高标号的水泥封底,井底水泥塞长度为3~5 m。

1.3 井口的要求

(1)井口处用高标号水泥配制混凝土浇筑井台,井台高出地面 ≤ 1 m,面积约为4 m \times 6 m。井口钢管要高出水泥井台平面0.5 m,井口要位于井台中央。井台建成后,在井口的周围标刻方位刻度;

(2)井台上应备有固定环,用于仪器下井时固定井架。

1.4 井房的设计要求

井孔和井台建成后,在井台上修建面积约为3

m \times 5 m,高度 ≤ 4 m的砖砌井房。房顶采用混凝土浇筑,并在井口正上方留有天窗。井房前要有约50 m²的空地。

1.5 测井与井下仪器安装定向

(1)在安装井下仪器之前要实测井孔温度,并绘制井孔温度随深度变化曲线;

(2)采用陀螺测斜仪测定井下仪器底座的方位,根据具体情况调整井下仪器的方位。

2 井下地震监测钻井与固井技术

地震监测井的钻井与固井技术措施主要取决于井位处的地层情况和井下地震监测对井孔的技术要求。2007年1月,在湖北省武汉市完成了第一口甚宽频带数字地震监测井。结合该项目具体介绍钻井工艺技术。

2.1 区域地质概况

地震监测试验井位于武汉市区东南方向约25 km的武汉九峰地震台。区内为前震旦纪变质岩组成的基底构造,构造线呈北西-南东向。岩层倾向南西,倾角32°~55°。在局部地段尚发育次一级背向斜,其轴线与上述构造线一致,轴面近于直立。

区内覆盖层为第四系更新统(QP₂)冲积、洪积、残积红色粒状粘土,底部夹碎石和砾石;下部基岩在东南部为二叠系下统(P₁m)茅口组含碎石圆块灰岩,西北部变相为硅质岩,为泥盆系上统(D₃)石英状砂岩、石英砂岩。并含有志留系上中一统(S₂₋₃)粉砂岩、砂质泥岩、粘土岩。区内还含有少量东西向的燕山早期侵入岩——石英闪长斑岩。

2.2 水文地质概况

区内地下水按含水地层的岩性、赋存条件及水力性质划分为4大类型:(1)松散堆积层孔隙水;(2)碎屑岩裂隙孔隙承压水;(3)基岩裂隙水;(4)碳酸盐岩裂隙岩溶水。

其中,孔隙承压含水层埋深浅,且岩性厚度变化不大,水量较丰富。碳酸盐岩裂隙岩溶水分布于远离地表水体的低山丘陵和岗状地形上,赋存条件较复杂,水量不均一。

综上所述,区内工程地质水文地质情况较为复杂。钻孔所穿越岩层主要是含有夹层的石英砂岩,岩层倾角大,非常坚硬且破碎,钻进取心困难。

2.3 钻井技术

由于钻井穿越的地层为坚硬的石英砂岩,岩层倾角为32°~55°,并夹杂强风化破碎带及泥岩(见图1)。针对该项目的特点采用了以下技术措施。



图 1 现场岩心照片

2.3.1 钻井结构

钻井场地上部为 5 m 厚的第四系覆盖层,下部为石英砂岩。石英砂岩单层厚度不大,一般厚 0.5 ~ 1.5 m,软硬层互层,裂隙发育,泥质充填,岩石非常破碎。为了达到监测井技术要求,防止钻孔坍塌和渗漏,最终确定钻井结构如图 2 所示。

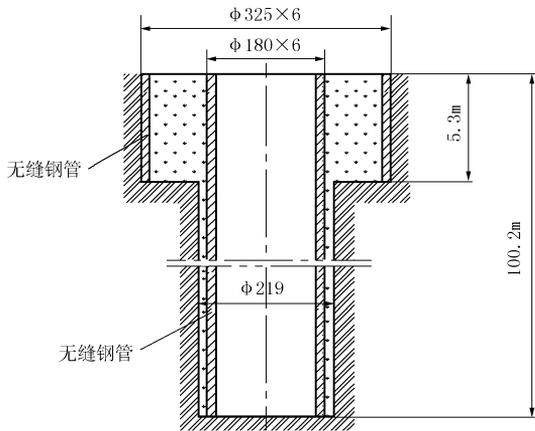


图 2 钻井结构示意图

2.3.2 钻进方法与设备

采用 $\text{Ø}325$ mm 硬质合金不取心钻进方法钻穿第四系覆盖层,然后采用 $\text{Ø}219$ mm 金刚石取心钻进。配备的主要设备为 XY-4 型钻机和 BW250 型泥浆泵。

2.3.3 井斜的控制

由于所钻地层主要为石英砂岩和泥质充填的软硬交互层,且换层频繁,岩层倾角为 $32^\circ \sim 55^\circ$,钻井容易产生偏斜。为此,采取了综合性的防斜工艺技术措施。即采用外径为 219 mm、长度为 6 m 加长钻具进行满眼钻进,对钻具外径与钻头直径配合尺寸以及钻具的长度、刚度进行优化组合,并合理控制钻压,从而达到控制井斜保证钻井垂直度的目的。

2.4 固井技术

固井是保证地震监测井使用质量的重要环节。通过固井保证井下钢管的稳定性,防止地下水渗入监测井内,同时保证地震监测仪与地层很好的耦合。

2.4.1 膨胀固井水泥的选配

2.4.1.1 膨胀剂的优选

为了增加牢固度,保证防渗效果,采用膨胀水泥固井。水泥膨胀剂是一种由各种盐类混合而成的水泥添加剂。使用膨胀剂的目的是在水泥浆内导入一定的膨胀应力即压应力,部分或全部补偿水泥石干缩、冷缩产生的拉应力,从而阻止或减小水泥石的收缩,避免水泥石的收缩值超过其极限拉伸值,防止或减少水泥浆凝固后的开裂,达到抗裂防水目的。膨胀剂一般不含钠盐,不会引起混凝土碱骨料反应。

膨胀剂种类繁多,膨胀源各异,如 AFt、Ca(OH)₂、Mg(OH)₂、Fe(OH)₃ 等。常见的膨胀剂类型有:CaO 类型的膨胀剂(CEA);MgO 类型的膨胀剂;明矾石 [K₂SO₄·Al₂(SO₄)₃·4Al(OH)₃] 类型的膨胀剂(EA-L);硫铝酸盐矿物(UEA、CSA)和铝酸盐矿物(AEA)类型的膨胀剂;复合膨胀剂。

为了能选用最适合本项目的水泥膨胀剂,在实验室对多种型号的膨胀剂进行了不同配合比的实验,根据实验结果最终选择了武汉三源特种建材公司生产的 UEA-1 型混凝土膨胀剂。该膨胀剂的初凝时间为 2 ~ 3 h,养护 28 天后膨胀率为 0.02%。经过试验确定膨胀剂的添加量为 10%。

2.4.1.2 水泥膨胀剂使用技术

(1) 膨胀剂掺量的多少直接影响灌注的水泥浆的膨胀效应,从而影响其发挥补偿收缩的功能。因此严格按照实验所得水泥浆的配合比掺入足够量的膨胀剂;

(2) 现场拌制水泥浆的拌和时间比普通混凝土延长 30 s,以保证膨胀剂和水泥拌合均匀,提高其匀质性;

(3) 水泥浆灌注过程中,应保持其连续性,避免出现分层现象;

(4) 待固井完成后将井管校正固定,保证水泥浆不被扰动,使膨胀组分——钙矾石能充分生成,达到抗裂防漏效果。

2.4.1.3 注浆量计算

井管和井壁之间的环空间隙的体积:

$$\begin{aligned} V_1 &= \pi \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right] h + \pi \left[\left(\frac{D_0}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right] h \\ &= 3.14 \times \left[\left(\frac{0.219}{2} \right)^2 - \left(\frac{0.18}{2} \right)^2 \right] \times 94 + \\ &\quad 3.14 \times \left[\left(\frac{0.45}{2} \right)^2 - \left(\frac{0.18}{2} \right)^2 \right] \times 6 \\ &= 1.9212 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

灌注过程中钻杆内驻留的浆液体积:

$$V_2 = \pi \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 h = 3.14 \times \left(\frac{0.035}{2}\right)^2 \times 120 = 0.1154 \text{ m}^3$$

理想状态下所需的泥浆的体积:

$$V = V_1 + V_2 = 2.0365 \text{ m}^3$$

式中: D ——钻井直径; d ——井管外径; d_1 ——钻杆内径; h ——钻井井深; D_0 ——上部孔口直径。

选取425水泥作为固井浆液,按水灰比0.45计,水泥浆的密度 ρ 按 $1.88 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 计算,需要的水泥浆质量:

$$G = \rho V = 1.88 \times 10^3 \times 2.0365 = 3.829 \times 10^3 \text{ kg}$$

考虑到井壁内漏失及灌注过程中的损耗,按5%计,应配置水泥浆4 t。其中所需水的质量: $G_1 = 4 \times 0.45 = 1.8 \text{ t}$ 。425水泥的质量: $G_2 = 4 \times (1 - 0.45) = 2.2 \text{ t}$ 。

2.4.2 井管的连接与密封

(1)在第一根井管底部装有单向阀,其目的是保证井管外的泥浆不回流到井管内,保证井管内壁的清洁,为后续井下地震监测仪的安装提供良好的通道。因此,在吊放井管过程中,需一边下放井管一边在井管内注入适量的清水,使井管内外基本达到压力平衡。

(2)井管与井管连接的接头处采用特殊的矩形丝扣、强力密封胶和电焊三重连接密封措施,完全保证了井管的垂直和密封性。

(3)依次吊放并焊接井管,直到设计深度,并用夹具将其居中固定在井内,再进行水泥固井。

2.4.3 固井注浆方法

在固井注浆过程中要在井管与井壁之间注满固井水泥浆液,并且在其凝固之前保证在100 m的液柱压力下浆液不回流到井管内。为此,专门设计加工了单向注浆装置(见图3)。

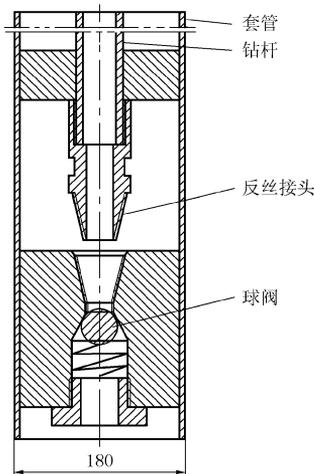


图3 单向阀装配示意图

固井注浆工艺过程为:将带有特殊反丝接头的钻杆与井管底部单向注浆装置相连接。用泥浆泵将浆液通过钻杆和单向注浆装置从井底注入井管与井壁之间的环状间隙中。待固井水泥浆上返到井口即停止注浆,然后拧卸钻杆并清洗钻杆中的残留水泥浆,等待固井水泥凝固。采用该单向注浆装置获得了良好的固井效果。

2.4.4 井底排水与干燥

在环空间隙的固井水泥浆完全凝固后,采用钢丝绳卷扬机构及专门制作的提桶将井管内的浆液提出地面,并用吸水海绵和干燥的棉絮沾吸井管底部的残余浆液,保证井管内部的干燥。

3 结语

(1)采用井下地震监测方法可以减小地面噪声干扰,提高地震监测精度和仪器放大倍数,取得可靠、连续、完整的地震记录图,准确测定地震基本参数(发震时刻、震级、震中位置、震中距离和震源深度),为预报地震和开展各项研究工作提供基础资料。

(2)地震监测井的选址、井深、井径、井斜和固井等参数有其特殊的技术要求,应合理的设计或采用相应的钻井技术措施,以达到优质地震监测井的技术指标。

(3)武汉甚宽频带数字地震监测1井采用大口径金刚石取心钻进方法和加长粗径钻具满眼钻进的综合防斜工艺技术措施,在含有夹层的石英砂岩,岩层倾角大,非常坚硬且破碎,钻进取心困难的复杂条件下,取得了良好的钻井工程效果。

(4)固井是保证地震监测井使用质量的重要环节。通过固井保证井下钢管的稳定性,防止地下水渗入监测井内。同时保证地震监测仪与地层很好的耦合。采用专门设计的单向注浆装置、优化固井膨胀水泥浆配方以及合理的固井工艺,保证了优良的固井质量。

参考文献:

- [1] 李粮纲,等. 武汉九峰井下地震监测仪钻井竣工技术报告[Z]. 武汉:中国地质大学(武汉),2007.
- [2] 国家地震局. 地震台站观测规范[M]. 北京:地震出版社,1978.
- [3] 冯德益,张少泉,等. 深井观测地震波典型记录与分析应用[M]. 北京:地震出版社,1990.
- [4] 孟晓春. 地震信息分析技术[M]. 北京:地震出版社,2005.
- [5] 国家地震局科技监测司. 中国地震预报方法研究[M]. 北京:地震出版社,1991.
- [6] 修济刚. 我国井下地震观测研究概述[J]. 国际地震动态, 1988,(6).