

地震监测钻井设计及工艺研究

李粮纲,周奕,黎艺明,王鹏飞,吴朋青,邱敏,易威

(中国地质大学(武汉)工程学院,湖北武汉 430074)

[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;井下地层形变观测可以摆脱地表的天然及人为干扰,使观测数据更加真实地反应地层变化情况,可大幅度提高震源定位精度。本文结合实际工程对地震监测井的设计、钻井和固井的工艺技术进行了分析研究。针对地震监测井的特殊要求,采用了钻井综合防斜保直技术和分层注浆固井新工艺,使所建地震监测井的垂直度和固井质量都达到了优良,为获取精准的地震监测数据提供了基本保障。

[关键词]井下地震监测 钻井 固井 分层注浆

[中图分类号] P641

[文献标识码] A

[文章编号] 0495-5331(2013)05-0970-6

Li Liang-gang, Zhou Yi, Li Yi-ming, Wang Peng-fei, Wu Peng-qing, Qiu Min, Yi Wei. A study of design and drilling technology for earthquake monitoring wells [J]. *Geology and Exploration*, 2013, 49(5): 0970-0975.

1 引言

自汶川地震和玉树地震之后,我国更加重视地震监测与预报研究工作,并进一步加强地震监测台网的建设与升级。湖北省“十一五”期间,在地震台网建设方面投入了近1亿的资金,全面提升了地震台网的软硬件,对井下地震监测做了重点研究。

新增的地震监测井分为地声观测井和地层形变观测井两种类型。地声观测井可观测极微震、超微震的变化规律;地层形变观测井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,使观测数据更加真实地反应地层变化情况。

为了使地震监测井达到精准观测的目标,首先必须保证钻井的各项技术指标满足地震监测的要求。因此地震监测井的钻井设计和施工工艺直接影响监测数据的精度和可信用度。

2 地震监测钻井设计

2.1 井孔选址

在选择地震监测井点时,应避免振动源和油田开采区或工业采水区,避开滑坡和易发生洪涝的地区。一般根据干扰源的特性选取1~5 km的避开距离。避开距离最小值应达到在深井实地测试时的最大干扰双振幅要求。

地下流体综合观测井应选在地应力容易集中的地方。如活动断裂带,特别是深大断裂带的端点、拐点、交汇点。由于这些断裂带切入地壳很深,形成了许多地下水的天然通道,当巨大块体相对运动时,断裂带是地下活动最剧烈的地方,同时也是地下水最活跃的地方。

地下流体综合观测井还应选在具有一定封闭条件的承压含水地层。这种含水层受降雨、蒸发、渗透的影响很小,能客观反映地壳的应变状态。

2.2 监测井设计

2.2.1 监测井最佳深度

地声监测井的干扰幅度随井孔深度的增加而减小;另一方面,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:

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

$$R_h = R_0 \times 10^{-\lambda_N h}$$

式中:

S_0 、 S_h —分别为地面和深度为 h 处的信号;

R_0 、 R_h —分别为地面和深度为 h 处的干扰;

λ_N 、 λ_s —分别为干扰和信号的衰减系数;

信噪比为:

$$S_h/R_h = (S_0/R_0) \times 10^{(\lambda_N - \lambda_s) h}$$

如果信噪比提高一个量级,即:

$$\text{令} (S_h/R_h)/(S_0/R_0) = 10,$$

$$\text{取对数} \log((S_h/R_h)/(S_0/R_0)) = 1,$$

可得出:

$$h_1 = \frac{1}{\lambda_N - \lambda_s} \log \frac{S_h/R_h}{S_0/R_0} = \frac{1}{\lambda_N - \lambda_s}$$

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

$$1/(\lambda_N - \lambda_s) > 1/\lambda_N$$

因此:

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

也就是使信噪比提高一个量级的起始深度为 $1/\lambda_N$ 。

实际监测数据结果表明,在基岩地层的监测井,设计井深为 100m 就足以满足监测要求。若在覆盖层较厚的平原地区,则井下仪器安放在地下 300 ~ 500m 深度,可得到良好的地震记录。

2.2.2 监测井的垂直度

对于地声监测井,其垂直度要求取决于传感器的类型。一般要求监测井中心线与垂直线的偏差不能超过 3°,但随着仪器精密度的提高,对垂直度的要求越来越高。如果在平原地区,井深为 500m,则要求每 100 m 不超过 0.5°。这对于钻井施工难度较大。

2.2.3 完井与固井

完井和固井质量对于地震监测井十分重要。地声监测井和地层形变监测井对固井和完井的要求有所不同。地声监测井完井和固井要求如下:

- (1) 采用直径为 146 ~ 180mm 的无缝钢管做井管,井管的连接采用特殊丝扣连接与焊接,确保井管内壁连接平滑且密封不渗水;
- (2) 在井管与围岩之间灌注高标号的水泥浆,使井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 ~ 5m;

(4) 固井后先清洗井管,然后排干井内积水,最后用吸水海棉将井内水吸干;

(5) 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 4m × 6m。井管高出水泥井台面 0.5m,并在井口标刻方位刻度。

地下流体监测井在完井和固井方面与地声监测井最大的不同点是:固井应满足封闭全部非观测层的要求。即井的上部采用无缝钢管做井管,并在井管与围岩之间灌注高标号的水泥浆固井;而井的下部则采用花管与观测层连通。为了保证观测精确度,井管尽可能不变径。为此,需要采用特殊的成井和固井技术。

2.2.4 抽水试验与渗透系数计算

对于地下流体观测井,抽水试验主要是为了查明地层渗透系数、导水系数、压力传导系数、给水度、越流系数、影响半径等有关水文地质参数,为地震观测提供水文地质资料。由于条件限制,地震观测井往往采用单孔的稳定流抽水试验。

通过抽水试验获得的相关数据,对于不同类型的观测井采用不同的方法计算渗透系数。

潜水非完整井,单孔抽水试验采用以下方法计算渗透系数 k :

$$k = \frac{0.366Q}{LS} \lg \frac{0.66L}{r}$$

式中:

- k —渗透系数(m/d);
- Q —抽水井涌水量(m^3/d);
- L —过滤器长度(m);
- S —抽水井水位下降值(m);
- r —抽水井半径(m)。

承压水非完整井,单孔抽水试验则渗透系数 k 计算方法是:

$$k = \frac{Q}{2\pi \cdot r \cdot S}$$

式中:

- k —渗透系数(m/d);
- Q —抽水井涌水量(m^3/d);
- r —抽水井半径(m);
- S —抽水井水位下降值(m)。

2.2.5 地下气体及同位素的测定

国内外大量的观测资料表明,地下气体对现今地壳动力过程的响应是十分灵敏的,而且已经成为地震监测预报的重要手段之一。地下气体不仅映震

表 1 地震台网部分监测井的概况

Table 1 General situation of some monitoring wells in a seismic network

序号	井位地址	井深(m)	井斜(度)	井型	建井时间	备注
1	武汉九峰	350	1.5	地下流体观测井	2011.10	
2	黄冈	206	0.5	地震监测井	2012.4	
3	荆州	201	0.5	地震监测井	2012.8	
4	丹江口盛湾	103	1	地下流体观测井	2012.7	
5	丹江口唐扒	101	1	地下流体观测井	2012.8	
6	丹江口雷庄	250	1.2	地下流体观测井	2012.9	
7	监利	210	0.5	地震监测井	2012.10	
8	襄阳	300	1.5	地下流体观测井	2012.10	改建
9	十堰房县	118	0.3	地下流体观测井	2013.4	

能力强,而且震前异常特征也十分明显。观测的项目主要有:He、H₂、Ar、O₂、N₂、CH₄、CO₂及气体总量。

地震发生前后,常伴有流体元素和同位素地球化学异常。因而,将氢、氧、碳、铅、惰性气体等同位素作为地震前兆的指示剂,可以为震前监测、地震监测等方面的研究和应用提供重要的信息。

3 地震监测井的钻井工艺

地震监测井的钻井工艺与监测井的类型以及钻井的地质环境条件紧密相关。在湖北省“十一五”地震监测台网升级建设期间,中国地质大学工程学院与湖北省地震局及市县地震局共同完成了多个地震台网监测井的建设工作(表1)。总结和研发了一套完整的钻井工艺技术,并取得了良好的工程应用效果。

3.1 观测井保直防斜钻井技术

地震观测井对井孔的垂直度要求较高。因此,必须根据实际工程地层条件及设计要求,采用相应的保直防斜钻井技术以满足地震观测井的技术要求。

3.1.1 钻机安装与钻具垂直校验

- (1) 安装设备前,地基要平整、坚实、填方部分不得超过 1/3 基台木要水平、稳固。
- (2) 对钻机立轴进行垂直度校验,上对塔顶天车,下对设计井位。此外,在钻进过程中还要经常检查和校正立轴方向。
- (3) 要保证开孔时钻具的垂直度,特别是粗径钻具要直。埋设井口管要牢固。
- (4) 换径时,应采用带导向的综合式异径钻具。

3.1.2 合理的钻具结构

采用合理的钻具结构,是为了增强钻具的稳定

性和导正作用,以改善下部钻具的弯曲形态,提高钻进时的防斜能力。

钟摆钻具、偏重钻具和满眼钻具等形式的组合钻具对防止和纠正钻井弯曲有明显的效果。

(1) 钟摆钻具

采用较短长度的岩心管,约 1.5~2m,其上连接钻铤。钻铤质量大于孔底所需的钻压,中和点落在钻铤上。在钻具与孔壁的切点以下,由钻具质量引起的横向分力将钻头推向孔壁下方,此力称为钟摆力(减斜) F_d 。

$$F_d = W\sin\theta \cdot \frac{l}{L}$$

式中:

- W —切点以下钻铤的质量;
- θ —钻孔顶角;
- L —孔底与切点的距离;
- l —切点以下钻具的重心与切点的距离。

根据钟摆力计算公式,当钻井顶角一定时,增大减斜力的途径是:加大切点以下钻具的质量,如选用厚壁钻铤等;在略高于切点的位置上装一扶正器,提高切点的位置,或以增大切点以下钻铤长度的方法来增大钻具的质量。此外,采用扶正器还可以减小下部钻具的倾斜角和增斜力,从而进一步加大钻具的防斜能力。

(2) 偏重钻具

通过在普通钻铤的一侧钻若干浅孔,使钻铤重心偏移,而形成偏重钻具。偏重钻具旋转时产生离心力,离心力大小与转速和偏心距成正比。钻进时,当偏重朝向井壁下侧时,离心力与钟摆力方向一致,可以对井壁产生较大的冲击纠斜力,使钻井倾角逐渐减小。同时,由于这种周期性的旋转不平衡性,使

下部钻柱发生强迫振动,这种弹性的横向振动,会增大钻头切削井壁下侧的能力。此外,由于离心力的作用,使偏重钻铤的重边在旋转时永远贴向井壁,这样就使下部钻柱具有“公转”的特性,消除了自转对井斜的影响,在直井中更具有防斜作用。

为了发挥偏重钻铤的防斜作用,宜采用高转速。同时,在组合钻具中,应把质量差集中在钻具下部,尽量接近钻头,并使偏重钻铤的减重部分的质量位于距轴线尽可能远的部分,才能有效发挥作用。钻铤重边和轻边的质量差推荐为钻铤总重的 0.5% ~ 5%。实践表明,偏重钻铤的长度一般在 9m 左右就能起到良好的纠斜作用。

(3) 满眼钻具

满眼钻具是由 3 ~ 5 个直径与钻头直径相近的扶正器和外径较大的钻铤(如方钻铤)组成,可以增大钻具的刚度,减小钻头倾斜角,保持钻具在井内居中。因此,能限制由于钻柱弯曲而产生的增斜力。

使用满眼钻具时,要计算扶正器的安装位置,并经常检查扶正器的磨损情况,一般应保证扶正器与井壁的间隙小于 1mm,若大于 4mm 则扶正器完全失去“满眼”的作用。

满眼钻具用于垂直钻井时,虽然可以消除或减小工艺技术因素对井斜的影响,减弱地质因素的促斜作用,但并不能完全避免井斜的发生。因此应及时了解钻进过程中的井斜情况与防斜效果。

对于易斜地层,当采用上述方法仍不能控制井斜的情况下,可采用中国地质大学(武汉)研制的随钻测斜垂钻系统。

3.2 成井和固井技术

对于地震地下流体观测井,为了准确监测观测层地下流体的变化情况,必须严格把观测层和非观测层隔离开来,避免观测数据受降雨和浅层抽水等影响。此外,为了保证观测精确度,采用的井管尽可能保持直径不变径。因此,需要采用特殊的成井和固井技术。

3.2.1 分层注浆工艺

分层注浆是向非观测层注入水泥浆并保证水泥浆不进入观测层。通过分层注浆把观测层与非观测层的流体隔离开来,阻止非观测层的流体流入观测层而影响观测的准确性。分层注浆的固井工艺如下:

(1) 井管连接及吊放

按照钻井的实际井深和非观测层与观测层的厚度确定井管和花管的长度,采用特殊丝扣依次连接

并吊放到井内。

(2) 井内架桥

在井管与花管的连接处井管外缠绕水敏性膨胀橡胶;在该段套管内设置临时封堵塞,并安放在井内非观测层与观测层分界处。膨胀橡胶遇水后体积胀大,并与井壁产生一定的接触压力,形成密实的充填隔离,将钻井分隔成上下两段。

(3) 定量注浆及固井

使用定量注浆器向分隔处灌注水泥浆,形成一定长度的封堵水泥柱(如图 1 所示)。封堵柱达到一定强度后,将钻杆下放至井内架桥的位置,进行水下注浆固井。注浆过程中密切注意注浆压力的变化。

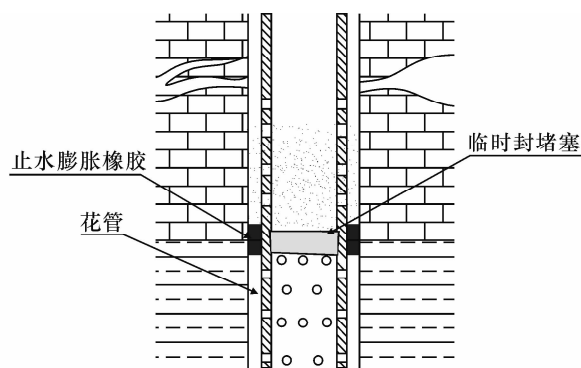


图 1 分层注浆工艺示意图

Fig.1 Schematic diagram showing technology of layered grouting

(4) 清扫井管

注浆量达到设计要求后,采用压浆活塞将井管内水泥浆压至环空间隙,待环空间隙的水泥浆凝固 5 ~ 8d 后,采用比井管直径小一级的钻具清扫井管内的封堵物,直至井底。

分层注浆最为关键的环节是井内架桥。所采用的水敏性膨胀橡胶既有普通橡胶制品的各种性能,又有遇水膨胀的性能。这种橡胶浸入水中,体积会膨胀增大,膨胀后的体积是原来体积的 2 ~ 3 倍。其膨胀率不受水质的影响,不含有害物质,无析出物,不污染环境,而且具有抗老化和抗腐蚀性能。膨胀后的橡胶仍保持原来的弹性和延伸性。

在使用这种膨胀橡胶时,还须注意以下几点:

① 对选用的水敏性膨胀橡胶进行实验室试验确定其实际性能。

② 使用前切忌遇水受潮,以免材料过早膨胀影响使用效果。应放置在干燥的室内,避免阳光直射。

③ 与水敏性膨胀橡胶接触的管材表面应平整

并处理干净,无浮灰、油污、杂物和松动。

④ 膨胀橡胶止水条对接时,接口需平整,相互接触。应避免在急弯或阴阳角附近对接。

⑤ 施工过程中往往因遇雨使止水条或基面潮湿,导致止水条过早膨胀。可选择缓膨型水敏性膨胀橡胶止水条。

3.2.2 固井水泥

为了保证井管与地层较好的耦合,在固井水泥中掺入一定量的水泥膨胀剂,使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,达到抗裂防渗的效果。水泥膨胀剂是一种由各类盐混合而成的水泥添加剂。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 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 等。常见的膨胀剂类型如下:

(1) CaO 类型的膨胀剂(CEA);

(2) MgO 类型的膨胀剂;

(3) 明矾石 $[\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 4\text{Al}(\text{OH})_3]$ 类型的膨胀剂(EA-L);

(4) 硫铝酸盐矿物(UEA、CSA)和铝酸盐矿物(AEA)类型的膨胀剂;

(5) 复合膨胀剂。

为了选择适合地震测井用的水泥膨胀剂,在实验室对多种型号的膨胀剂进行了不同配合比的实验,确定膨胀水泥的膨胀率。

膨胀率实验设备主要由三部分构成,即釜体装置、温度控制系统、PVT 压力控制系统。

釜体装置主要用来放置被测试的水泥浆(石)试样,提供一个密闭的高温高压环境。温度控制系统用来设定不同的升温时间和目标温度,达到模拟井下环境温度的要求。PVT 压力控制系统用来准确控制釜体压力。通过数据采集系统准确计量在给定的压力下某时刻推动活塞位移的水泥浆体积变化量以及任一时刻流入/流出釜体的水泥浆体积累积量。

对实验所获得的数据进行分析计算,绘制膨胀率发展变化曲线,确定膨胀率,最终优选出合适的水泥膨胀剂种类及添加量。

3.2.3 井管连接丝扣密封胶

井管的连接密封对于安装测震仪的监测井是非常关键的一个环节。

在实际工程中,井管的螺纹连接处都采用了性能良好的密封胶,即第三代液态生料带密封。这种“液态生料带”,具有以下性能:

(1) 胶液 100% 反应,固化后略膨胀,从而填充整个螺纹间隙达到锁紧密封作用;

(2) 密封压力高,固化后可耐 69MPa 以下的压力,耐腐蚀,保护金属螺纹;

(3) 耐高温($-55^\circ\text{C} \sim +150^\circ\text{C}$),耐老化、耐大多数介质、耐油等等;

(4) 用于金属螺纹,其固化速度与金属的活性和温度成正比。

在使用过程中,胶液与空气接触时,胶液保持液态,将胶液涂在螺纹上形成圆周并装配闭合时,在金属螺纹内因缺氧并在金属离子的催化作用下,产生固化反应,填充整个螺纹间隙,形成高强度,耐腐蚀,耐高温(150°),耐老化(寿命超过钢材),密封锁固性极强的热固性塑料。用这种新方法保证了井管的连接密封防水抗渗。

4 结论

(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)。深井地下流体观测可以摆脱地表的天然及人为干扰,如降雨、抽水、交通等等,使观测数据更加真实地反应地层变化情况,为预报地震和开展各项研究工作提供真实可靠的数据资料。

(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,应合理地设计并采用相应的钻井技术措施,使地震监测井达到优良的质量指标。

(3) 固井是保证地震监测井工程质量的重要环节。良好的固井工艺可以保证井管的稳定性,防止地下水渗入地声监测井内,同时保证地震监测仪与地层很好的耦合。地下流体观测井采用专门设计的注浆器具和分层注浆固井新工艺,提高了地下流体观测井的建井质量。

[References]

- Che Yong-tai, Yu Jing-zi, 2006. Seismic subsurface fluidics [M]. Beijing: Meteorological Press: 28 - 68 (in Chinese)
- Fan La-sheng, Zhang Wei, Li Qian-gui, Li Xu-dong, Zhao Yuan-gang. 2012. Application of liner cementation technology in Wenchuan earthquake fault scientific drilling project [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 39(9): 32 - 38 (in Chinese)

nese with English abstract)

Hu Yu-le. 2011. Application of the grouting cement method with two-step filling water to collapsed formation of the scientific drilling bore-hole in Tibet [J]. Geology and Exploration, 47(3):469 – 472 (in Chinese with English abstract)

Luo Zhi-qi. 2012. Deviation prevention and correction for intermediate level waste liquid disposal field in strong natural whip-stocking stratum drilling [J]. Exploration Engineering (Rock and Soil Drilling and Digging Engineering), (12):9 – 11 (in Chinese with English abstract)

Li Liang-gang, Wang Peng-fei, Zhou Yi. 2012. Jingzhou earthquake observation well drilling technology and accident treatment[J]. Exploration Engineering (Rock and Soil Drilling and Digging Engineering), (10):77 – 79 (in Chinese with English abstract)

Meng Xiao-chun. 2005. Earthquake information analysis technology [M]. Beijing: Seismic Press: 76 – 80 (in Chinese with English abstract)

Sang Lai-yu, Ding Shi-dong, Zhao Yan. 2000. Oil well cement expanding agent indoor testing and evaluation [J]. Petroleum Drilling Techniques, 28(3):24 – 26 (in Chinese with English abstract)

The State Earthquake Administration. 1978. Seismic station observation specification [M]. Beijing: Seismic Press: 6 – 52 (in Chinese)

The Science and Technology Monitoring Department of the State Earth-

quake Administration. 1991. The China earthquake forecast method research [M]. Beijing: Seismic Press. 1 – 106 (in Chinese)

[附中文参考文献]

车用太, 鱼金子. 2006. 地震地下流体学[M]. 北京: 气象出版社: 28 – 68

樊腊生, 张 伟, 李前贵, 李旭东, 赵远刚. 2011. 汶川地震断裂带科学钻探项目尾管固井技术的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 39(9):32 – 38

胡郁乐. 2011. 分步替水灌浆法在科学钻探西藏钻孔坍塌地层中的应用[J]. 地质与勘探, 47(3):469 – 472

罗治奇. 2010. 中放废液处置场强自然造斜地层钻进的防斜纠斜[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), (12):9 – 11

李粮纲, 王鹏飞, 周 奕. 2012. 荆州地震观测井钻井技术与事故处理[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), (10):77 – 79

孟晓春. 2005. 地震信息分析技术[M]. 北京: 地震出版社: 76 – 80

桑来玉, 丁士东, 赵 艳. 2000. 油井水泥膨胀剂室内检测与评价[J]. 石油钻探技术, 28(3):24 – 26

国家地震局. 1978. 地震台站观测规范[M]. 北京: 地震出版社: 6 – 52

国家地震局科技监测司. 1991 中国地震预报方法研究[M]. 北京: 地震出版社: 1 – 106

A Study of Design and Drilling Technology for Earthquake Monitoring Wells

LI Liang-gang, ZHOU Yi, LI Yi-ming, WANG Peng-fei, WU Peng-qing, QIU Min, YI Wei
(China University of Geosciences, Wu Han, Hubei 430074)

Abstract: The down – hole seismograph can monitor lots of weak earthquake waves that can not be recorded by ground seismographs. The down – hole strata deformation observation can avoid natural and human disturbances on the surface of the earth, which allows observational data to reflect truly strata changes, and greatly improves the source location accuracy. In this work, combined with practical engineering, the design of earthquake monitoring wells, drilling and cementing technology were analyzed. According to the special requirements of earthquake monitoring wells, the technology of preventing bore-hole deviation and the new craft of layered grouting cement were adopted during the drilling, making the perpendicularity of the earthquake monitoring wells and cementing quality both be excellent, which provides a basic guarantee to obtain accurate earthquake monitoring data.

Key words: down – hole earthquake monitoring, drilling, cementing, layered grouting