

地质超深钻孔自寻北陀螺测斜仪研制

周策^{1,2}, 王瑜¹, 刘一民^{2,3}, 陈文俊²

(1. 中国地质大学(北京)国土资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 610081; 3. 四川大学制造科学与工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 阐述了解决在高达 280 °C 高温、孔深 8000 m 环境的地质超深钻孔自寻北陀螺测斜的技术问题。采用新型低功耗耐高温电子元件集成电路、隔热保温材料, 利用高温焊接技术、密封技术、隔热保温技术及自寻北陀螺测斜技术, 研制在高温、高压钻孔环境中既能保证质量又能保证安全的钻孔测斜仪以及研究相应的测斜工艺技术方法。

关键词: 测斜仪; 陀螺; 加速度计; 地质超深钻孔

中图分类号: P634.7 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2014)03-0036-05

Development of the Automatic North-finding Gyroscope Inclinometer for Super-deep Geological Drilling/ZHOU Ce^{1,2}, WANG Yu¹, LIU Yi-min^{2,3}, CHEN Wen-jun² (1. Key Laboratory on Deep Geodrilling Technology of Ministry of Land and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 610081, China; 3. School of Manufacturing Science & Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: This text elaborates the technique problems of automatic north-finding gyroscope survey for super-deep geological drilling in the condition of high temperature of 280°C and depth of 8000m. New low power and high temperature resistance electric components, integrate circuits and heat insulation material are adopted; and the techniques of high temperature welding, sealing, high temperature resistance and automatic north-finding gyroscopic survey are used to develop the bore-hole inclinometer which can not only ensure the quality and safety of the borehole in high temperature and high pressure environment and search out the related technologies for inclination survey.

Key words: inclinometer; gyroscope; accelerometer; super deep geological drilling

1 问题的提出

钻孔测斜技术是我国地质勘查关键技术之一, 在我国地质调查和国民经济其他领域有着广泛的应用前景。但我国地勘现有钻孔测斜仪不能配套用于将要开始或有的地区已经开始的地质超深钻孔勘探和开发。现有地勘钻孔测斜仪适应的工作环境温度最大也只有 150 °C, 需要研究设计在温度高达 280 °C、孔深 8000 m 环境的地质超深钻孔自寻北陀螺测斜技术, 并保证安全测斜。

2 解决问题的可能性

新型低功耗电子元件集成电路发展、先进的焊接技术、密封材料技术、隔热保温材料及隔热保温技术、自寻北陀螺测斜技术提供了研究地质超深钻孔自寻北陀螺测斜技术的物质基础。表 1 为几种常见钻孔测斜方法精度对比, 从表 1 可以看出, 自寻北陀螺测斜仪是适合地质超深钻孔测斜的最佳方案。

表 1 几种常见钻孔测斜方法对比

仪器	测深的位移误差 /[ft·(10000 ft) ⁻¹]	探管外径/in	评价
磁性仪器	200	2.25	磁干扰及磁场变化, 精度差
自由陀螺	100	2~3	进动漂移大, 精度较差
自寻北陀螺	20~30	1.75	尺寸小, 精度高, 无漂移
惯性导航	1	10.60	精度极高, 但直径太大, 结构复杂

3 解决地质超深自寻北陀螺测斜仪技术方案

3.1 地质超深自寻北陀螺测斜仪机芯组成设计

地质超深自寻北陀螺测斜仪主要部件选用三轴陀螺(一只动调陀螺和一只微机械陀螺)、三轴石英加速度计、一只步进电机, 一套数据采集处理模块, 一套 DC-DC 电源, 一块数据存储模块及相关结构件构成, 工作原理框图如图 1 所示。

3.2 地质超深自寻北陀螺测斜仪数学解算模型设计

3.2.1 初始对准与倾角、方位角测量

收稿日期: 2013-10-17; 修回日期: 2013-12-26

基金项目: 本课题得到国土资源部深部地质钻探技术重点实验室开放课题“深孔孔底钻探参数实时采集关键技术研究”(NLS201201)资助

作者简介: 周策(1965-), 男(汉族), 四川成都人, 中国地质大学(北京)国土资源部深部地质钻探技术重点实验室, 中国地质科学院探矿工艺研究所教授级高级工程师(三级), 探矿工程专业, 从事地质灾害监测技术与仪器的研究工作, 四川省成都市一环路北二段 1 号, 449730588@qq.com。

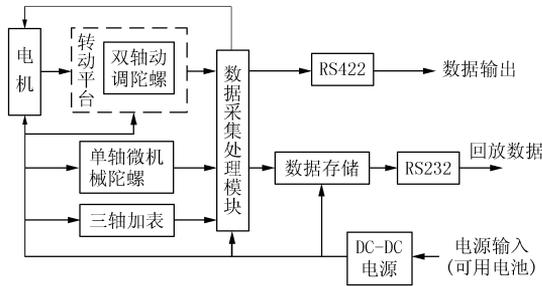


图 1 地质超深自寻北陀螺测斜仪组成

如图 2 所示, $OXYZ$ 为地心坐标系, $OENU$ 为当地地平坐标系, $Oxyz$ 系为仪表坐标系, $Oxyz$ 各轴间与 $OENU$ 一致。图中 $Oxyz$ 系沿 U 轴旋转为方位角 ψ , 这时没有倾斜变化。

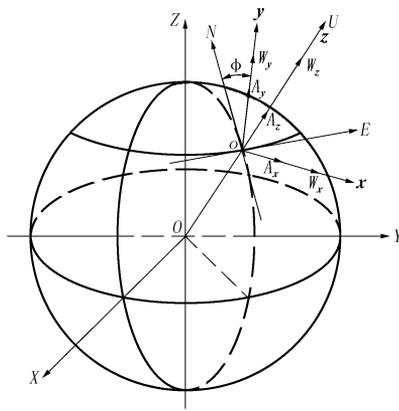


图 2 各有关坐标系示意图

如图 3 所示, 当测斜仪从孔口沿井体运动, 令 $Ox'y'U$ 是 $Oxyz$ 原在 $OEUN$ 上面坐标系, $Oxyz$ 坐标系相对 $OENU$ 和 $Ox'y'U$ 各轴都可能发生姿态变化。其中 ψ_D 是 Oz 轴在水平面投影 Oz' 与 ON 轴的夹角, 即方位角, Ox' 与 N 轴的夹角为工具面向角 ψ_g , Oz 与 OU 的夹角为顶角 φ 。

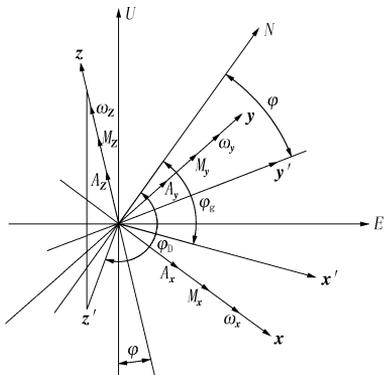


图 3 在钻孔中任一点时的 $OENU, Oxyz$ 和 $Ox'y'U$ 坐标系

高温测井仪在测井过程中, 在任何点上、任何时候只要保持静止, 都可以实现初始对准, 计算方法如

下。

利用在静止条件下, 电机由 0° 转动 90° 、 180° 、 270° 各位置采集的数据清除陀螺零位后, 并利用陀螺加表的数据, 计算出 Ox' 、 Oy' 轴的地球自转分量 $\omega_{x'}$ 、 $\omega_{y'}$:

$$\omega_{x'} = \omega_x \cos\varphi_{xox'} + \omega_y \cos\varphi_{yox'} + \omega_z \cos\varphi_{zox'}$$

$$\omega_{y'} = \omega_x \cos\varphi_{xoy'} + \omega_y \cos\varphi_{yoy'} + \omega_z \cos\varphi_{zoy'}$$

式中: $\varphi_{xox'}$ 、 $\varphi_{yox'}$ 、 $\varphi_{zox'}$ ——分别为 Ox 、 Oy 、 Oz 与 Ox' 的夹角; $\varphi_{xoy'}$ 、 $\varphi_{yoy'}$ 、 $\varphi_{zoy'}$ ——分别为 Ox 、 Oy 、 Oz 与 Oy' 的夹角。

由此可求出方位角:

$$\psi_0 = \text{tg}^{-1}(\omega_{y'}/\omega_{x'})$$

则工具面向角为:

$$\psi_{g0} = \text{tg}^{-1}(N_{AY}/N_{AX}) + \text{tg}^{-1}(\omega_{y'}/\omega_{x'})$$

式中: N_{AX} 、 N_{AY} 、 N_{AZ} ——分别为 X 、 Y 、 Z 向加速度。

同样由加表、陀螺可以求出 Ox 、 Oy 轴对 $Ox'y'z'$ 的倾角 α_0 、 β_0 , 以及欧拉角 θ_0 、 γ_0 , 由此可求出顶角和顶角方位角:

$$\varphi_0 = \sin^{-1}[\cos\alpha_0 \sqrt{1 - \cos^2\alpha_0 \sin^2\beta_0}]$$

$$\psi_{D0} = \psi_0 + \cos^{-1} \frac{\sin\alpha_0 \cos\beta_0}{\sqrt{\sin^2\alpha_0 + \cos^4\alpha_0 \sin^2\beta_0}}$$

在测井仪沿井体运动时, 以上述结果为起始值, 利用陀螺输出数据计算欧拉角求出:

$$\psi_\omega = \int [(1/\cos\theta)(\omega_z \cos\gamma - \omega_x \sin\gamma)] dt + \psi_0$$

$$\theta = \int (\omega_z \sin\gamma - \omega_x \cos\gamma) dt + \theta_0$$

$$\gamma = \int [\omega_y - \text{tg}\theta(\omega_z \cos\gamma - \omega_x \sin\gamma)] dt + \gamma_0$$

并由此, 可求出动态过程中的 α_ω 、 β_ω , 从而在运动时求出顶角、方位角、工具面向角:

$$\varphi_i = \varphi_0 + \sin^{-1}(\cos\alpha_\omega \sqrt{1 - \cos^2\alpha_\omega \sin^2\beta_\omega})$$

$$\psi_{Di} = \psi_{D0} + \psi_\omega + \cos^{-1} \frac{\sin\alpha_\omega \cos\beta_\omega}{\sqrt{\sin^2\alpha_\omega + \cos^4\alpha_\omega \sin^2\beta_\omega}}$$

$$\psi_{gi} = \psi_{g0} + \psi_\omega$$

3.2.2 地质超深自寻北陀螺测斜仪数学解算误差分析

自寻北陀螺测斜仪常见的主要误差源中任何一种都可归入下述 5 类基本误差中的一类。

(1) 结构误差: 这种误差与全套系统结构有关, 比如测量平台上各元件的机械校准误差。

(2) 实际元件误差: 这是实际惯性仪表与其设计性能间的偏差。

(3) 机械编排误差: 为了简化系统整个系统机

械编排时作了近似所产生的误差。

(4)操作方法误差:在特殊情况下采用的方法所产生的误差,它包括精确校准时采用设备不够理想出现的误差和装调仪表时方法不完善所引起的偏差等。

(5)由运动产生的误差:该误差与加速度的变化有关,因此对运动状态下的测斜探管来说,这一误差主要取决于运动过程中运动的次数及其持续时间。

上述各类误差都是单独考虑的,因此需要对测斜仪探管中的陀螺、加表参数误差专门的补偿、测量工艺过程的补偿以及测量数据的数值分析模型拟合。本文仅介绍陀螺加表参数误差补偿方法。

3.2.3 地质超深自寻北陀螺测斜仪数学解算陀螺加表参数误差补偿方法选择

加速度计误差模型及误差系数:

$$N_{AX} = K_{ox} + K_{Lx} W_x + K_{yx} W_y + K_{zx} W_z$$

$$N_{AY} = K_{oy} + K_{xy} W_x + K_{Ly} W_y + K_{zy} W_z$$

$$N_{AZ} = K_{oz} + K_{xz} W_x + K_{yz} W_y + K_{Lz} W_z$$

式中: K_{ox} 、 K_{oy} 、 K_{oz} ——加速度计偏置; K_{Lx} 、 K_{Ly} 、 K_{Lz} ——线加速度计比例系数; K_{yx} 、 K_{zx} 、 K_{xy} 、 K_{zy} 、 K_{xz} 、 K_{yz} ——线加速度计交叉耦合; W_x 、 W_y 、 W_z ——线加速度计输入。

陀螺仪误差模型及误差系数:

$$N_{\omega_x} = K_{\omega_{ox}} + K_{\omega_x} \omega_x + K_{\omega_{yx}} \omega_y + K_{\omega_{zx}} \omega_z + k_{ax} \omega_x$$

$$N_{\omega_y} = K_{\omega_{oy}} + K_{\omega_y} \omega_y + K_{\omega_{yx}} \omega_x + K_{\omega_{yz}} \omega_z + k_{ay} \omega_y$$

$$N_{\omega_z} = K_{\omega_{oz}} + K_{\omega_z} \omega_z + K_{\omega_{zx}} \omega_x + K_{\omega_{zy}} \omega_y + k_{az} \omega_z$$

式中: $K_{\omega_{ox}}$ 、 $K_{\omega_{oy}}$ 、 $K_{\omega_{oz}}$ ——陀螺零位; K_{ω_x} 、 K_{ω_y} 、 K_{ω_z} ——陀螺比例系数; $K_{\omega_{yx}}$ 、 $K_{\omega_{zx}}$ 、 $K_{\omega_{xy}}$ 、 $K_{\omega_{zy}}$ 、 $K_{\omega_{xz}}$ 、 $K_{\omega_{zy}}$ ——陀螺交叉耦合; k_{ax} 、 k_{ay} 、 k_{az} ——陀螺对加速度计的敏感系数; ω_x 、 ω_y 、 ω_z ——输入角速率。

有关K的系数都是温度的函数。在考虑温度变化时上述有关的K要加上 ΔK_T , ΔK_T 是温度引起的变化。

$$\Delta K_T = K_T \Delta T$$

式中: K_T ——温度系数, ΔT ——温度变化量。

3.3 地质超深自寻北陀螺测斜仪技术方案设计

3.3.1 技术方案设计分析

地质超深自寻北陀螺测斜仪要在280℃高温、8000m孔深环境下使用,采用常规钻孔测斜仪的方法,需要解决耐280℃高温的传感器、集成电路芯片和配套的电子元件,这些耐高温的器件国内外都难购到。另需高温测井电缆,一般高温电缆只能承受200℃高温,并且要配套电缆绞车,此套系统不仅价格昂贵,而且现场操作极为麻烦,费时费力。

(1)本技术方案是采用新材料和新方法研制新型超真空绝热无磁保温瓶(图4),当外部环境温度为280℃时,保温瓶内部温升小于60℃。

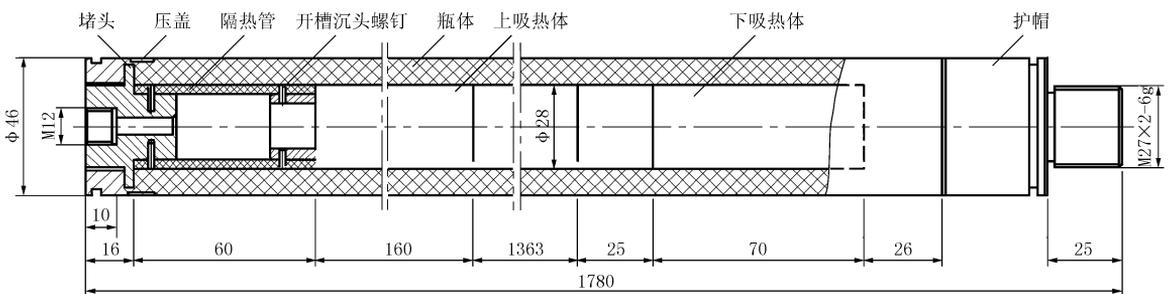


图4 超真空绝热无磁保温瓶结构示意图

(2)将钻孔测斜仪芯片、电路板以及电池置放其中进行绝热保温。这样测斜仪的部件以及电池都不易被高温损坏。总体设计加工一个孔下测斜探管(图5)。保温瓶、钻孔测斜仪以及电池均置放其中。测斜时将孔下测斜探管与钻杆连接或采用钢丝绳打捞器连接(绳索取心钻进工艺)下孔测斜。

(3)保温瓶中的钻孔测斜仪(图5)采集数据方式设计为存储式,下孔测斜探管可按规范分段进行全程测量,其测量数据存储在测斜仪电路中,测斜探管提到地面时,将存储的测斜信号取出采用有线或无线方式送到便携式电脑回放读取钻孔测斜的数

据。由于测斜探管设置可外接充电和取信号装置,探管提到地面后无须拆卸,可避免测斜探管在高温下操作和保持长期稳定工作。

3.3.2 保温瓶温度设计核算

采用新材料和新方法研制新型超真空绝热无磁保温瓶(图4),当外部环境温度为280℃时,保温瓶内部温升小于60℃。

由比热容的公式:

$$Q = cm\Delta t$$

式中: Q ——热量, J; c ——比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; m ——质量, kg; Δt ——温差, $^\circ C$ 。

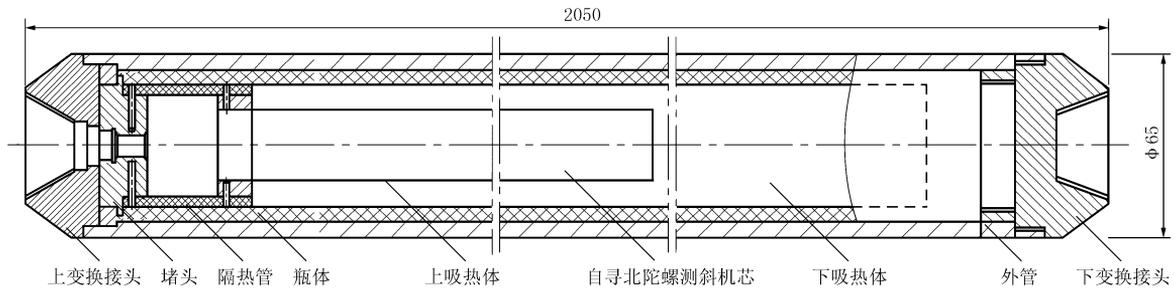


图5 地质超深自寻北陀螺测斜仪探管机芯结构示意图

吸热时: $Q_{\text{吸}} = cm(t - t_0)$

放热时: $Q_{\text{放}} = cm(t_0 - t)$

式中: t ——末温, $^{\circ}\text{C}$; t_0 ——初温, $^{\circ}\text{C}$ 。

$Q > 0$ 时为吸热, $Q < 0$ 时为放热。

吸热时: $t = Q/cm + t_0$

放热时: $t = t_0 - Q/cm$

一般钢铁的比热容 $c = 460 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

初温可设定为保温瓶内部温升 60°C , 即 $t_0 = 60^{\circ}\text{C}$ 。

地质超深自寻北陀螺测斜仪探管质量 $m = 5 \text{ kg}$ 。

仪器功率 4.8 W , 那么每小时发热量 $4.8 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 17280 \text{ J}$ 。

工作 8 h , 发热量 $Q = 8 \times 17280 = 138240 \text{ J}$ 。

吸热时: $t = Q/(cm) + t_0 = 138240/(460 \times 5) + 60 = 120^{\circ}\text{C}$ 。

因此设计的地质超深自寻北陀螺测斜仪机芯探管最大耐温应在 120°C 。

当然也可在超真空绝热无磁保温瓶内灌入高温吸热硅油材料, 降低发热产生的温升。

3.4 地质超深自寻北陀螺测斜仪测量工艺设计

3.4.1 数据存储

通过测井仪内设置的数据存储模块, 可以将测井的数据存储起来, 回到地面后进行重放。

3.4.2 零速校正

如果测井仪工作时间长, 可以通过在井内任何位置停 (5 min) 下来进行零速校正, 消除顶角、顶角方位角、工具面向角积累的误差。

3.4.3 点工作方式

测井仪可以停止在井内任何点进行测量。

3.4.4 连续测量方式

测斜仪可以在孔内连续工作, 记录下时间、顶角、方位角、工具面向角的连续变化。地面记录下时间、孔深。

3.4.5 数据输出读取方式

(1) 双向通信三芯电缆传输距离 $\geq 1000 \text{ m}$, 串口 RS485。

(2) 记录存储方式

①回放数据串口 RS232, 按通讯协议执行, 将地面记录时间、孔深与孔内连续工作记录下时间、顶角、顶角方位角、工具面向角对应的时空关系, 获取测量钻孔不同孔深位置的时间、孔深、顶角、顶角方位角、工具面向角;

②可连续存储 8 h 内的工作数据。

3.4.6 本设计特点

(1) 能自动完成顶角、顶角方位角、工具面向角的初始对准。

(2) 在测量过程中可用零速校正清除测量过程中积累误差。

(3) 数据可以存储。

(4) 设计方案选用的耐高温器件可靠性高, 使用寿命长。能在 120°C 的环境条件下工作。

(5) 设计的该仪器具有良好的环境适应性、耐冲击、振动。

(6) 可连续测量, 也可定点测量。

(7) 不受磁干扰, 在有磁铁矿, 地磁异常的情况下, 也能正常工作。

4 地质超深自寻北陀螺测斜仪测试

选择了校验台测试及钻孔中测量易产生的故障温度、压力、冲击、振动。

(1) 研制的地质超深自寻北陀螺测斜仪采用数字多用表、万能分度头和 JIG-2 型测斜仪校验台等仪器设备、调试和标定。表 2 为地质超深钻孔自寻北陀螺测斜仪倾角和方位角值测试表。

(2) 高温贮存: 仪器应能经受 $+280^{\circ}\text{C}$ 、 24 h 的高温贮存试验, 试验后逐渐恢复至常温。

(3) 高温工作: 产品在 $+280^{\circ}\text{C}$ 环境下能正常工作。

(4) 密封压力试验: 将探头放在密封试压容器内

表2 地质超深钻孔自寻北陀螺测斜仪器倾角和方位角值测试

/(°)

倾角	校正台读数					实测读数									
	方位角					倾角	误差	方位角	误差	方位角	误差	方位角	误差		
90						89.90	-0.10								
85	0	90	180	270		84.90	-0.10	359.8	-0.2	88.40	-1.60	178.58	-1.42	271.17	1.17
80	0	90	180	270		80.10	0.10	0.5	0.5	88.85	-1.15	178.3	-1.76	271.6	1.6
70	0	90	180	270		69.90	-0.10	1.06	1.06	88.9	-1.1	178.5	-1.5	271.5	1.5
60	0	90	180	270		60.11	0.11	1.12	1.12	88.7	-1.3	178.25	-1.75	271.39	1.39
50	0	90	180	270		49.86	-0.14	1.3	1.3	89	-1	178.5	-1.5	271.06	1.06
40	0	90	180	270		39.88	-0.12	1.4	1.4	90.53	0.53	178.43	-1.57	270.51	0.51
30	0	90	180	270		29.92	-0.08	1.42	1.42	90.84	0.8	178.7	-1.3	270.55	0.55
20	0	90	180	270		19.80	-0.20	1.57	1.57	90.9	0.9	178.1	-1.9	269.66	0.66
10	0	90	180	270		10.18	0.18	0.88	0.88	89	-1	181.9	1.9	268.2	1.8
0	0	90	180	270		0	0	359	-1.5	88.8	-1.2	181.8	1.9	268.4	-1.6

结论:倾角为 $85^{\circ} \sim 0^{\circ}$ 时方位角误差最大值为 $\pm 1.9^{\circ}$,倾角 $90^{\circ} \sim 0^{\circ}$ 最大误差 $+0.18^{\circ} \sim -0.20^{\circ}$

密封加水压,压力 80 MPa,持续时间 2 h。

(5)冲击试验:产品轴向冲击加速度为 70g、持续时间 5~8 ms,共冲击 1 次。

(6)振动试验:仪器在频率 10~200 Hz,加速度 10g 条件下,工作 3 min。

5 结语

(1)随着地质超深地质勘探工作的发展,对钻进工艺和钻孔测斜技术提出了更高的要求,现有的地勘钻孔测斜技术已不能满足温度高达 280℃、8000 m 孔深地层环境的钻孔测斜要求,需研制适合上述工作环境的地质超深地勘钻孔测斜仪器和技术方法。

(2)研制在地质超深钻孔中既能保证质量又能保证安全的钻孔测斜仪以及研究相应的测试工艺技术方法,是地质超深钻孔勘探和开发不可缺少关键技术。

(3)勘探和开采钻孔如不能测量孔斜质量或者测量质量不可靠将会带来不可估量的损失,甚至可能影响整个勘探和开发系统的成败。

(4)本项技术的成功不仅填补了地质超深钻孔测斜的空白,而且还可用于其他特种钻孔勘探,如为地下干热岩地质钻探找矿和开采的钻孔孔斜质量的测量提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 蔡春龙,刘翼,刘一薇. MEMS 仪表惯性组合导航系统发展现状与趋势[J]. 中国惯性技术学报,2009,17(5).
- [2] 郭帅,栾一秀,袁洪波,等. 动调式陀螺测斜仪控制电路设计[J]. 石油仪器,2012,26(3).
- [3] 高爽,张春熹,颜廷洋. 光纤陀螺油井测斜仪研究与设计[J]. 测井技术,2006,30(6).
- [4] 张宪起,董冀,俞瑛. 微机械陀螺仪性能指标测试及计算方法[J]. 集成电路通讯,2009,27(4).
- [5] GJB1183-1991,惯性导航系统用动力调谐陀螺仪通用规范[S].
- [6] 宋凝芳. 光纤陀螺捷联惯性系统研究与设计[J]. 中国惯性技术学报,2002,10(1).
- [7] 林彦兵,闫吉曾. 基于地磁参数和子午线收敛角计算的井斜方位角校正方法[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(12).
- [8] 蒋庆仙,马小辉,陈晓壁,等. 光纤陀螺寻北仪的二位置寻北方案[J]. 中国惯性技术学报,2006,14(3).

我国页岩气勘查开发进展顺利

中国地调局办公室消息(2014-03-19) 从全国地质调查工作会议上获悉,我国页岩气勘查开发进展顺利,截至 2013 年底累计完成页岩气钻井 285 口,2013 年页岩气产量达到 2.0 亿 m^3 。

据悉,2013 年,第二次页岩气探矿权招标的 16 家中标企业,已全面展开对 19 个招标区块的页岩气勘查工作;页岩气成藏机理研究取得新进展,研究表明:富有机质页岩厚度是基础,保存条件是关键;海相页岩气选区评价参数体系更加完善;页岩气勘查开发关键技术基本实现了国产化,可以自

己组织进行设计和施工;页岩气调查评价技术标注体系建设启动,首批 8 项技术要求和规范编写完成。

截至 2013 年底完成的 285 口页岩气钻井中,有调查井 105 口(直井)、探井 94 口(直井),评价井 86 口(水平井),经过水力压裂和测试,日产超过 1 万 m^3 的井 38 口(其中直井 18 口、水平井 20 口),日产超过 10 万 m^3 的井 23 口(其中直井 3 口、水平井 20 口),2013 年我国页岩气产量达到 2.0 亿 m^3 。