

GRY-1型超高温干热岩地层钻孔测斜仪研制及应用

周策¹, 罗光强¹, 李元灵¹, 谭现锋²

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 610081; 2. 山东省鲁北地质工程勘察院, 山东 德州 253072)

摘要:干热岩地层钻孔测斜技术是干热岩勘探和开发不可缺少的关键技术,然而现阶段地勘钻孔测斜技术已不能满足干热岩地层的钻孔测斜要求。其中孔底的高温高压是核心问题。为此,设计承压探管加无磁保温瓶的双层外管结构,采用先进的硬磁校准方法、选用耐高温元件、采用低功耗电路设计,研制了GRY-1型干热岩地层钻孔测斜仪,以满足高达280℃高温、孔深3000m的超高温干热岩地层钻孔轨迹测量的要求。通过试验应用,证明其在干热岩地层中具有良好的适用性,可助力干热岩资源的勘探和开发。

关键词:干热岩; 高温高压; 钻孔轨迹测量; 测斜仪; 磁阻传感器; 加速度计

中图分类号: P634.3; TE242.9 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2017)04-0044-05

Development and Application of GRY-1 Borehole Inclinometer for Ultra-high Temperature Hot Dry Rock Drilling/ZHOU Ce¹, LUO Guang-qiang¹, LI Yuan-ling¹, TAN Xian-feng² (1. Institute of Exploration Technology of CAGS, Chengdu Sichuan 610081, China; 2. Lubei Geo-engineering Surveying Institute of Shandong Province, Dezhou Shandong 253072, China)

Abstract: Drilling-hole trajectory measurement is an indispensable technology of the exploration and development of HDR. However, this technology at present stage cannot meet the requirements of inclination measurement in HDR strata. High temperature and high pressure at the hole bottom is the key problem. For this reason, by the double-layer outer tube structure design with the pressure-bearing probe tube and non magnetic thermos bottle, the use of the advanced hard magnetic calibration, the selection of high temperature resistance elements and low-power circuit design, GRY-1 inclinometer is developed to meet the requirements of the drilling-hole in HDR strata at the temperature up to 280℃ and depth of 3000 meters. The practical results show that GRY-1 inclinometer has good applicability in HDR strata and can contribute to the exploration and development of HDR resources.

Key words: hot dry rock; high temperature and high pressure; borehole trajectory measurement; inclinometer; magnetic resistance sensor; accelerometer

随着干热岩地层及其他地热资源勘探开发的进行,特别是钻孔深度的增加,这对钻井工艺和测量技术也提出了更好的挑战^[1-2]。虽然国内外已获得应用的钻孔测斜仪种类较多,但目前都不能配套用于干热岩地层勘探和开发需求^[3]。美国AGI公司、欧美大地仪器设备有限公司等企业生产的钻孔测斜仪适用的最高环境温度为250℃。而干热岩地层温度可达280℃以上,现有的地勘钻孔测斜技术已不能满足干热岩钻孔测斜要求,因此需研制适用于干热岩地层的超高温钻孔测斜仪,以获取准确的井眼轨迹,为干热岩的勘探开发利用保驾护航。

1 GRY-1型干热岩地层钻孔测斜仪结构及工作原理

1.1 测量原理

顶角测量是通过二维集成加速度计传感器矢量合成求得。常用钻孔顶角计算式为:

$$\theta = \arcsin \sqrt{\left(\frac{v_x - \Delta x}{v_{xm}}\right)^2 + \left(\frac{v_y - \Delta y}{v_{ym}}\right)^2} \quad (1)$$

式中: v_x 、 v_y —— x 轴、 y 轴传感器测量值, m/s; Δx 、 Δy —— x 轴、 y 轴零位值, mm; v_{xm} 、 v_{ym} —— x 轴、 y 轴水平输出最大值, m/s。

钻孔方位角是通过三维磁阻传感器测量,再与定向角进行合成求得的,常用钻孔方位角三分量计

收稿日期:2016-04-25; 修回日期:2017-02-22

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项“超高温钻孔轨迹测量仪开发和应用”(编号:2013YQ050791);中国地质调查局地质调查项目“干热岩高温钻探器具及工艺研究”子课题“干热岩地层钻孔测斜技术的研究”(编号:201411094-03)

作者简介:周策,男,汉族,1965年生,教授级高级工程师,探矿工程专业,从事地质灾害监测技术与仪器的研究工作,四川省成都市一环北路二段1号,449730588@qq.com。

算模式:

$$X_m^i = X_m^b \cos\theta + Y_m^b \sin\theta \sin\varphi + Z_m^b \cos\theta \sin\varphi \quad (2)$$

$$Y_m^i = Y_m^b \cos\theta - Z_m^b \sin\theta \quad (3)$$

$$Z_m^i = Z_m^b \quad (4)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Y_m^i}{X_m^i}\right) \quad (5)$$

式中: $X、Y、Z$ ——分别代表磁阻传感器三向输出, mm; $\theta、\varphi$ ——分别代表俯仰角、滚动角和定向角(定向标记位置角), ($^{\circ}$)。

1.2 测量系统结构

本监测仪中研制的“孔下黑匣子”数据采集系统的根本目的是监测钻孔轨迹,测量并记录其倾角(其余角为顶角)、方位角、工具面向角运动轨迹和温度。测斜仪本体设计方案见图 1。采用先进的数字技术和磁感应传感器设计的最新成果,磁感应传感器具有体积小、灵敏度高、线性度好、带宽宽、可靠性高等优点。

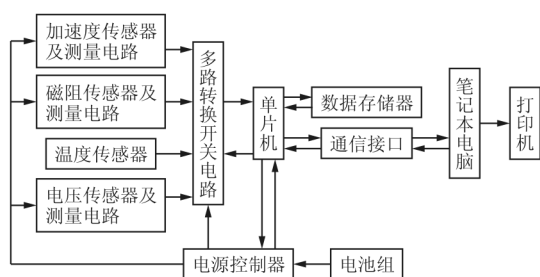


图 1 测斜仪本体设计方案图

整个系统中包含一个主系统和两个分系统。主系统通过测量出重力场三个相互垂直方向的加速度值和磁场三个相互垂直方向的加速度值、磁场强度值,完成顶角、工具面角和方位角的运算。高精度测量加速度的子系统上安装一个三维的重力加速度计和一个温度传感器,分别测量的是重力场三个相互垂直方向的加速度值和温度值。测量磁场强度磁阻的子系统是由一个三维的磁阻计垂直安装组成一个

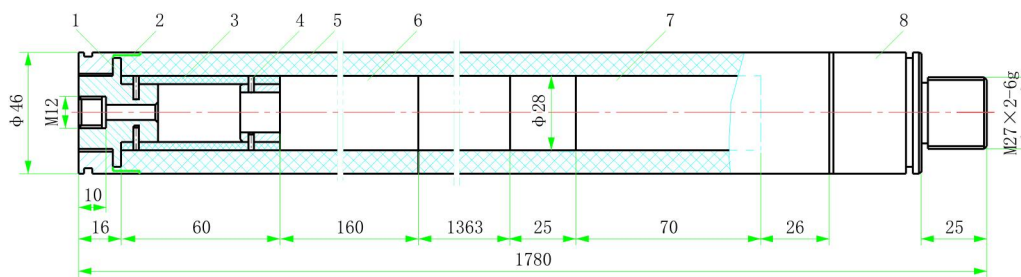
三维的磁阻计。

选择霍尼韦尔公司的 HMC6343 型及设计研制的 XA-3BM 型高精度线加速度传感器测量顶角、工具面角、方位角、三个相互垂直方向的重力场加速度和三个相互垂直方向的磁场。存储选用工业温度范围的铁电存储器。在高精度测量加速度的子系统中,要求选择高灵敏度的加速度传感器,共有 4 根数据线, $X、Y、Z$ 方向和地线。微处理器的选择内置了 24 位模数转换器的微处理器 ADuC847 对高精度测量加速度的子系统的传感器进行测量。

内置了先进的硬磁校准方法,使得在较为恶劣的磁环境情况下能够保证输出航向的准确性,具有模拟电路难以实现和无法比拟的优势。

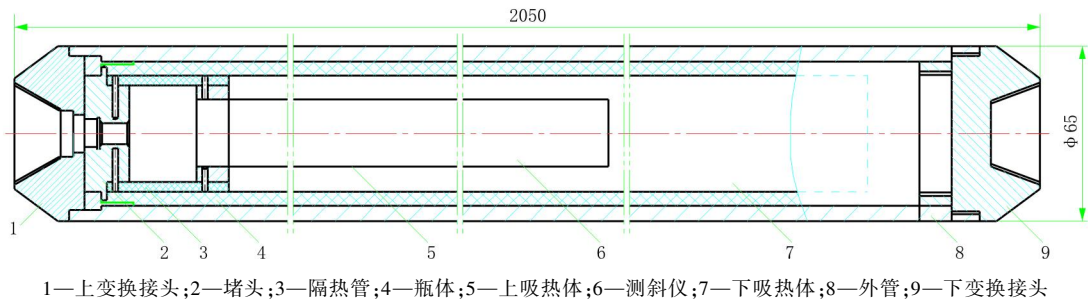
1.3 承压隔热结构

拟将钻孔测斜仪应用于 280 $^{\circ}\text{C}$ 的孔内高温环境,现有测斜仪很难满足这个温度要求。一是需要耐高温元器件且还需另配电缆绞车,不仅成本高昂,且现场使用不便。本文所述超高温干热岩地层钻孔测斜仪是采用新材料和新方法研制新型超真空绝热无磁保温瓶(见图 2),将所需传感器、电路及其他电子元件置于保温瓶中,以保证仪器的正常工作。经试验,所研制的保温瓶在外部环境温度为 280 $^{\circ}\text{C}$ 时,瓶内部温升 < 80 $^{\circ}\text{C}$,而一般的测井保温管只能承受 200 $^{\circ}\text{C}$ 环境温度。采用抗高温钻孔测斜仪芯片、电路板以及电池,减小测斜仪体积、增大吸热冷却空间,将测斜仪、控制器和电池置放其中进行保温,将内部元器件置于一个相对低的温度环境内。将保温瓶、传感器以及电池均安装在承压探管中(见图 3)。测斜时将孔下测斜探管与钻杆连接下入孔内测斜(绳索取心钻进可采用钢丝绳打捞器连接)。所测得孔斜数据存放在内部机芯中。待测斜仪提到地面时,将存储的数据采用转换接头传输至 PC 机上,进行下一步绘图处理。



1—堵头;2—压盖;3—隔热管;4—开槽沉头螺钉;5—瓶体;6—上吸热体;7—下吸热体;8—护帽

图 2 超真空绝热无磁保温瓶结构



1—上变换接头;2—堵头;3—隔热管;4—瓶体;5—上吸热体;6—测斜仪;7—下吸热体;8—外管;9—下变换接头

图3 测斜探管结构

1.4 整体结构

仪器包括孔内探管和地面数据读取处理软硬件,孔内探管主要包括耐280℃高温和30 MPa压力的承压管和高温保温管以及测量单元测斜仪机芯、电源、吸热体等,测斜仪机芯传感器为铝质外壳设计,体积小、质量轻、安装简便,每只传感器都进行温度漂移与灵敏度曲线的修正和全数字补偿,达到了宽温度工作和高精度的有效结合;内部集成有FLASH存储器,能够对测量的数据在线存储。用于干热岩非磁性矿区复杂地层280℃高温和30 MPa压力环境的钻孔定向测斜等领域的方向测量与控制等系统。

2 保温探管内温度及压力室内试验

2.1 保温测斜探管高温试验

将保温测斜探管放入高温试验台内,试验温度达280℃,室内环境28℃,4 h后保温测斜探管达到72℃,见图4、图5。

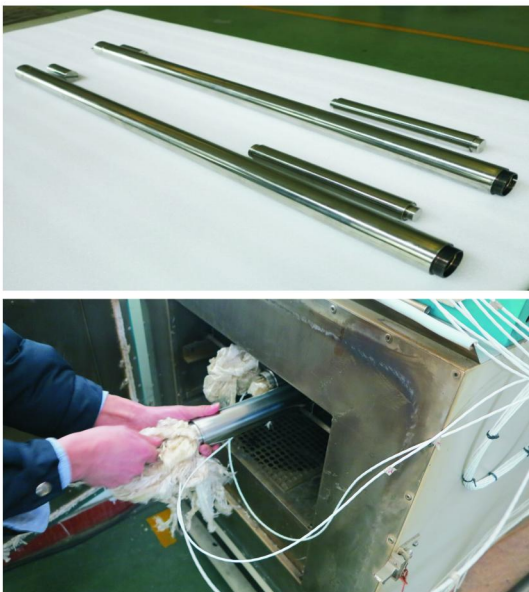


图4 保温测斜探管

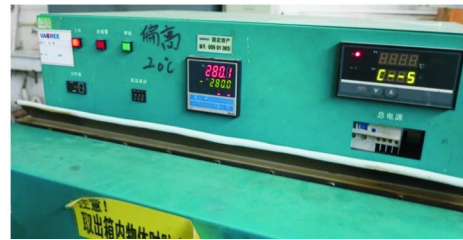


图5 280℃高温试验

2.2 承压管高压试验

将承压测斜探管放入高压试验台内,试验压力达30 MPa,4 h后将承压测斜探管取出,无漏,见图6。



图6 承压管高压试验

2.3 总结

通过以上试验证明承压隔热的高温高压探管设计是科学可行的。

3 测量工艺

GRY-1型超高温干热岩地层钻孔测斜仪内置了先进的硬磁校准方法,使得在较为恶劣的磁环境情况下能够保证输出航向的准确性,具有模拟电路难以实现和无法比拟的优势。选用的耐高温器件可靠性高,能在115℃的环境条件下工作,使用寿命长。仪器具有良好的环境适应性,耐冲击、振动,可连续存储12 h内的工作数据。

进行测量时,先通过数据串口 RS232 将测斜仪连接至上位机,通过上位机对测斜仪进行设置,包括测量模式、数据存储间隔、仪器开机时间、测量时间等,上位机界面如图 7 所示。设置完成后,通过钢丝绳或钻杆将测斜仪下入孔内开始连续测量或定点测量。下入过程中,地面记录下时间、孔深,仪器在孔底自动完成顶角、方位角、工具面向角的测量,并记录相应的时间,将数据存储在仪器中。待测量结束,提出测斜仪,再通过数据串口 RS232 将测斜仪连接至电脑,读取存储在测斜仪中的孔斜数据。将地面记录时间、孔深与测斜仪记录的时间、井斜数据相对比,即可获得精准的钻孔空间轨迹。



图 7 干热岩地层钻孔测斜仪软件人机界面

4 野外试验应用

4.1 试验钻孔介绍

中国地质调查局于 2013 年启动我国干热岩资源调查评价工作,分别在广东、福建、海南、湖南等地开展了区域地质调查与深部地球物理勘查,最终选定福建省漳州市清泉林场作为我国干热岩资源勘查优先靶区。为查明该区域的地质条件及干热岩地层

地热资源的赋存情况,由山东省鲁北地质工程勘察院在该区域进行干热岩地热科学钻探工程施工。该钻孔(干热 1 井)设计深度为 4000 m,套管深度 2500 m,终孔直径为 152 mm。

4.2 试验方法

本次野外试验共进行闭水试验、下钻测斜、提钻测斜 3 种试验方法,以检验 GRY-1 型干热岩地层钻孔测斜仪密封、隔热及测量数据的可靠性等性能。闭水试验为先导试验,主要为验证承压管的密封性能及了解孔底情况。为避免测斜仪核心组件因密封失效而损毁,进行闭水试验时,并不在外管内装入机芯,而是放入湿度试纸及馏点温度计。下钻测斜及提钻测斜时,将测斜仪组装完备,通过钻杆连接下入孔内,进行完整的钻孔测斜工作。

4.3 试验过程

试验时,测斜仪通过钻杆连接下入孔底。钻具前端为平底磨鞋,上接 $\varnothing 127$ mm 钻杆,测斜仪装入钻具内通道。试验过程中共下入 $\varnothing 89$ mm 钻杆 10 个立根, $\varnothing 127$ mm 钻杆 47 个立根,下入孔深为 1625 m。由于准备工作耗费一定时间,加之下钻过程中出现设备故障耽搁一定时间,整个试验过程耗时约 11 h。

由于仪器调试中将读取数据频次设置为 10 s 存一次,因此所获得的数据量较大,这样便于去除由于钻具振动等外在因素造成的大幅波动的试验数据,直接选取稳定后的数据并求平均值,即可提高试验数据的精度和可靠性。整理原始数据后绘制出下钻及提钻所测得的顶角随孔深变化曲线如图 8 所示。

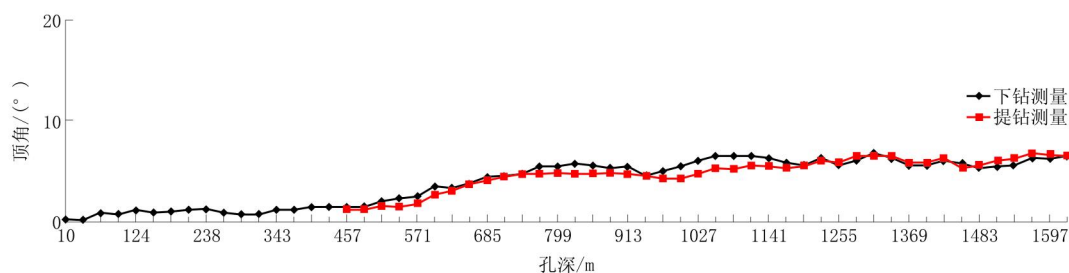


图 8 提下钻测斜数据对比曲线

由图 8 可以看出,下钻及提钻所测得的顶角变化曲线吻合地很好,大部分孔段是完全重合的。这表明测斜仪所测得的顶角数据是可靠的。

4.4 试验应用总结

本次试验应用说明,研制的 GRY-1 型干热岩地层钻孔测斜仪满足设计要求,下钻测斜与提钻测斜数据吻合较好,其测斜稳定可靠。在孔底的高温环境下,测斜仪保温瓶内机芯在长达 11 h 的运行

后,隔热保温瓶内温度从30℃上升到39℃,温度上升仅9℃,说明本仪器的隔热保温设计及低功耗电路散热设计是科学可行的,有相当的适用性。

5 结论

(1)干热岩地层钻孔测斜技术是干热岩地质勘探和开发不可缺少的关键技术,然而现有的地勘钻孔测斜技术已不能满足干热岩地层的钻孔测斜要求。而干热岩地层钻孔测斜技术的核心问题就是孔底高温高压环境对测斜仪的挑战。

(2)采用承压探管加无磁保温瓶的双层外管结构设计的GRY-1型干热岩地层钻孔测斜仪,极大地降低了干热岩地层的高温高压环境对测斜仪的影响。

(3)GRY-1型干热岩地层钻孔测斜仪内置先进的硬磁校准方法、选用耐高温元件、采用低功耗电路设计,提高了仪器精度和寿命,降低了自发热,使之具有良好的环境适应能力。

(4)通过在干热岩地层中的试验应用,验证了GRY-1型干热岩地层钻孔测斜仪的设计是可靠的、科学合理的,其在干热岩地层钻孔轨迹测量中有着良好的适用性。

参考文献:

[1] 冉恒谦,冯起赠.我国干热岩勘查的有关技术问题[J].探矿工

程(岩土钻掘工程),2010,37(10):17-21.

- [2] 赵福森,张凯.青海贵德ZRI干热岩井钻进工艺研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(2):18-23,35.
- [3] 杨吉龙,胡克.干热岩(HDR)资源研究与开发技术综述[J].世界地质,2001,(1):43-51.
- [4] 周策,陈文俊.存储式磁阻多点连续测斜仪的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(7):41-42,49.
- [5] 邵保平,赵金昌,赵阳升,等.高温岩体地热钻井施工关键技术研究[J].岩石力学与工程学报,2011,(11):2234-2243.
- [6] 徐晓东,赵忠,李丽锦.采用磁阻传感器与加速度计的电子罗盘设计[J].兵工自动化,2005,(5):21-22.
- [7] 唐建.LPC总线接口UART控制器FPGA实现[D].四川成都:电子科技大学,2008.
- [8] 彭立威.钻孔测斜仪数据处理系统的开发与监测成果分析方法研究[D].四川成都:成都理工大学,2011.
- [9] 杨庆.矿井钻孔测斜装置研制[D].安徽合肥:合肥工业大学,2014.
- [10] 李亚琛,段晨阳,郑秀华.高温地热钻井的最佳实践[J].地质与勘探,2016,52(1):13-181.
- [11] 李尚泽,杨明,邓昀,等.基于光纤陀螺的无线随钻测斜仪探管硬件设计[J].煤炭工程,2015,47(9):131-134.
- [12] 吴川,乌效鸣,国军,等.基于光纤陀螺和加速度计的测斜仪[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2015,(2):68-72.
- [13] Rand Husing MEMS Inertial Rate and Acceleration Sensor[J].IEEEAES system Magazine,1998.
- [14] Jiang YF. Error Analysis of Analytic Coarse Alignment Methods[J].IEEE Transactionson Aerospace and Electronic Systems,1998,34(1):334-337.
- [15] Mortensen RE. Strap down Guidance Error Analysis[J]. IEEE Transactionson Aerospace and Electronic System,1974,10(4):451-457.