

文章编号: 1001-1986(2019)03-0201-07

高温钻孔测斜仪研制

屈召贵¹, 龚名茂², 周策³, 汪光宅³

(1. 四川旅游学院信息与工程学院, 四川 成都 610100; 2. 四川工商学院电子信息工程学院, 四川 成都 611745; 3. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要: 针对高温高压干热岩钻井定位轨迹探测设备存在耐高温高压性能差、稳定性差、测量精度不高、电能消耗大等问题, 研制一套高温钻孔测斜装置, 解决高温高压多点连续钻孔测斜及测温问题。选择耐高温元器件, 设计控制和测量电路; 采用自动间歇供电方法, 减少散热, 降低功耗; 设计保温探管、承压探管, 利用 ANSYS 有限元软件对承压外管的屈服强度和保温探管的温度场与压力场进行耦合分析和校核。最后进行仿真测试和野外试验, 根据测试数据表明, 设备能在 280 °C 和 12 MPa 高温高压环境条件下实现深井倾角、方位角、工具面向角及温度的测量。

关 键 词: 测斜仪; 陀螺仪; 高温高压; 有限元分析

中图分类号: TH763.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.03.031



Development of high temperature borehole inclinometer

QU Zhaogui¹, GONG Mingmao², ZHOU Ce³, WANG Guangzhai³

(1. School of Information Engineering, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China; 2. School of Electronics and Information Engineering, Sichuan Technology and Business University, Chengdu 611745, China; 3. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu 611734, China)

Abstract: In the detection of high-temperature and high-pressure dry heat rock drilling location trajectory, the instrument has some problems, such as poor performance, poor stability, low measurement accuracy and large energy consumption. A set of high temperature borehole inclining device is designed to solve the problem of high temperature and high pressure measurement deviation and temperature measurement. Adopt high temperature resistant components, design control and measurement circuit. Automatic intermittent power supply is adopted to reduce heat dissipation and power consumption. The design of heat preservation pipe and pressure detection pipe is carried out by using ANSYS finite element software to conduct coupling analysis and check on the yield strength of the external pressure pipe and the temperature field and pressure field of the heat preservation detection pipe. Finally through the simulation test and experiment, according to the test data show that equipment can at 280 °C and 12 MPa under the condition of high temperature and high pressure environment deep dip angle, azimuth angle, tool face angle and temperature measurement.

Keywords: inclinometer; gyroscope; high temperature and pressure; meta-analysis

在矿产资源勘探和地质监测过程中, 需要通过钻孔了解地质信息。存储式光纤陀螺测斜是钻井工程中了解钻井施工质量的重要仪器, 其主要功能是测量井斜角和方位角。通过各测点井斜角值、方位角值以及各测点的孔深值, 再通过姿态解算方法计算即可间接求得各测点的空间位置, 从而获得井身轨迹数据。目前井深可达 8 000 m, 温度达 300 °C,

压力达 120 MPa。这给探测设备的应用环境提出更加严苛条件, 极大地限制了深井的探测。现有技术中用于超高温环境的测斜仪器只能适用于 250 °C 以下的环境测斜^[1-4]。基于此, 提出利用现有的光纤陀螺测斜组件, 设计主控制系统和电源管理, 设计保温探管和承压外管。以实现方位角测量范围 0°~360°, 精度(± 1.5)°(井斜 > 3°时); 井斜测量范围

收稿日期: 2018-04-07

基金项目: 四川省教育厅重点科研项目(自然科学)(16ZA0424)

Foundation item: Education Department of Sichuan Province Key Scientific Research Project(Natural Science)(16ZA0424)

第一作者简介: 屈召贵, 1980 年生, 男, 四川巴中人, 硕士, 副教授, 研究方向为仪器仪表和嵌入式计算机. E-mail: 35247485@qq.com

引用格式: 屈召贵, 龚名茂, 周策, 等. 高温钻孔测斜仪研制[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 201-207.

QU Zhaogui, GONG Mingmao, ZHOU Ce, et al. Development of high temperature borehole inclinometer[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3): 201-207.

0°~90°, 精度(± 0.15)°; 测斜探管外钻孔环境温度-10~270 °C范围内; 泥浆压力 120 MPa 的井孔轨迹测量。

1 系统组成结构分析

本设计主要针对测斜仪的光纤陀螺测量单元、主控制系统、保温探管和承压外管的进行分析设计与实现, 系统如图 1 所示。

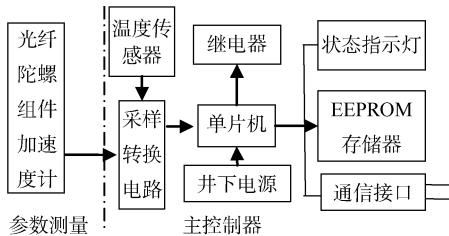


图 1 系统框图

Fig.1 Block diagram of the system

孔内探管主要包括耐 270 °C 高温和 30 MPa 压强的承压管、保温管和测量单元机芯构成。机芯由光纤陀螺组件、温度传感器、控制器、电源、吸热体、存储器、通信电路等构成。

2 测量系统设计

测量系统主要由光纤陀螺组件、主控制系统和电源管理构成。其电路设计和元器件的选择均应满足高温要求-25~125 °C。

2.1 光纤陀螺组件的选择

光纤陀螺采用干涉型光纤陀螺仪(I-FOG)方案。由光源、光纤耦合器、光探测器、Y 分支多功能集成光学芯片和光纤环组成。光纤陀螺主要技术指标如表 1 所示。

表 1 光纤陀螺的主要技术指标

Table 1 Main technical indexes of fiber optic gyroscope

技术指标	数值范围
动态范围/((°)·s⁻¹)	± 500
零偏稳定性/((°)·h⁻¹)	0.2(1σ)
标度因数非线性度/10⁻⁶	100
随机游走系数/((°)·h⁻¹²)	0.02
环境温度范围/°C	-25~85
输入电压/V	± 5

加速度计采用石英挠性加速度计, 主要技术指标如表 2 所示。

2.2 主控系统设计与实现

主控器系统主要承担光纤陀螺组件供电管理、数据采集、存储、数据通信和管外温度测量等功能。

表 2 加速度计主要技术指标

Table 2 Main technical indicators of accelerometer

技术指标	数值范围
动态范围/(m·s⁻²)	(± 5)g
分辨率/(m·s⁻²)	(5×10^{-5})g
环境温度范围/(°C)	-40~+175
标度因数温度系数/(10⁻⁶·(°C)⁻¹)	<20
标度因数综合误差/10⁻⁶	<50(1σ, 1个月)
输入电压/V	± 15

系统如图 2 所示。微处理器选用 Microchip 公司的 PIC18F25K80 单片机, 其工作温度范围为-40~150 °C。内置 32 kB flash 存储器、12Bit ADC、16Bit 定时器等资源, 能满足本项目的要求。通信接口使用 RS232 通信协议, 芯片选用 ADI 公司的工业级 RS232 芯片, 其工作温度范围为-25~125 °C, 实现主控制器与光纤陀螺组件通信和主控制器与 PC 机通信, 其电路如图 3 所示。存储器选用 MicroChip 公司的 EEPROM 存储器 25LC1024, 该存储器温度范围达-40~150 °C, 容量为 256 kB, 按照测量模块每组数据 42 Byte 计算, 一共可存储 6 241 组数据, 存储光纤陀螺组件传送的姿态参数和温度参数, 电路如图 4 所示。外部温度测量部分, 使用高精度的 PT100 温度传感器及专用 PT100 测温转换器 MAX31865 芯片, 该芯片可以直接通过 SPI 接口输出 PT100 的实际温度所对应的二进制补码, 通过转换即可输出温度^[5-7]。

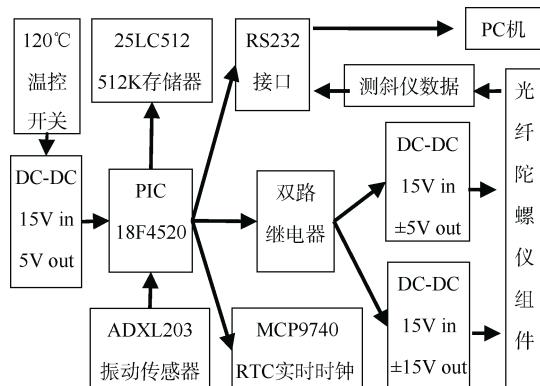


图 2 主控电路图

Fig.2 Master circuit diagram

2.3 电源供电管理设计与实现

电源供电管理主要是解决整个测量系统的电能。由于系统使用高功率、一次性、便携式电池, 对于电池能量、体积要求非常高, 设计中采用智能化间歇供电方式, 以降低功耗、减小温升、延长电池的使用时间。具体: 测量探管在下放的过程中, 要求光纤陀螺组件处于断电状态, 当下放到指定高度停止下放时开始供电工作。光纤陀螺需要(± 5) V 和(± 15) V 电源, 设计中利用 ADXL203 加速度计进

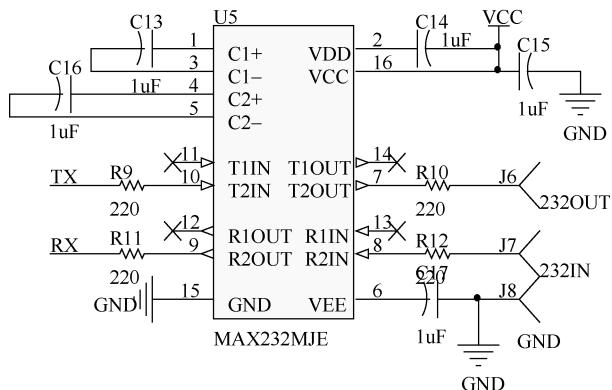


图 3 通信电路图

Fig.3 Communication circuit diagram

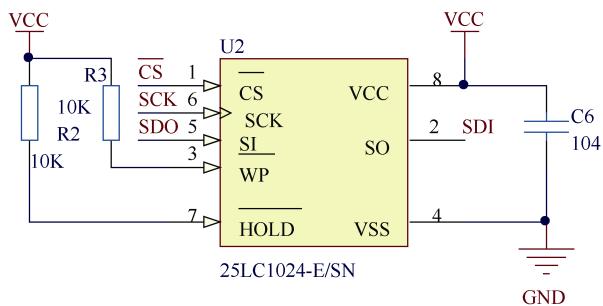


图 4 存储电路图

Fig.4 Store circuit diagrams

行振动检测(探管静止与运动),通过继电器开关电源。继电器选用耐高温继电器 HF-32-A,工作其电流可达 2 A,温度范围为-25~125 °C,符合环境要求。高温电池型号为 4ER34615S,由 4 只锂/亚硫酰氯(Li-SOCl₂)电池串接而成,其单只电池开路电压为 3.65 V,容量达 12 Ah,且工作温度范围-40~165 °C。电路如图 5 所示。

3 承压外管管体设计

机械结构设计主要由承压外管、保温内管两部分，设计参数如下：

承压外管规格内径 61 mm、外径 73mm、有效长度 2 600 mm；

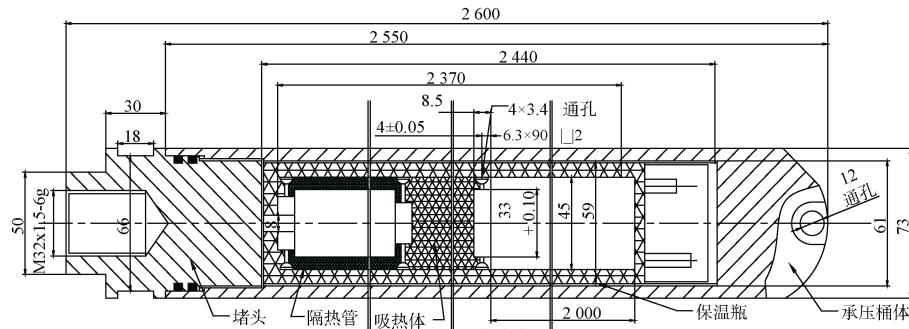
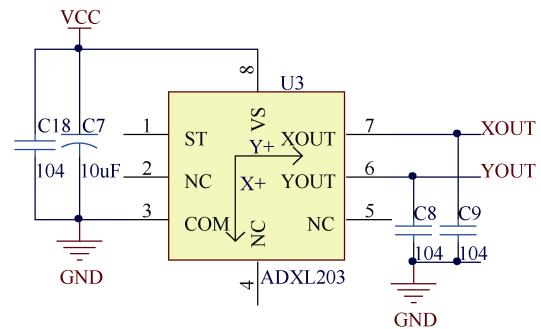


图 6 承压外管图(单位: mm)

Fig.6 Pressure piping diagram



(a) 振动检测电路

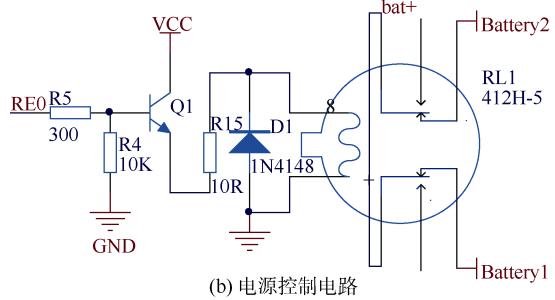


图 5 电源管理电路图

Fig.5 Power management circuit diagram

保温探管规格内径 45 mm、外径 59 mm、有效长度 2 440 mm；

保温性能环境温度 270 °C , 工作 4 h , 管内温升低于 80 °C ;

耐压 120 MPa ;

内外壳直线度小于等于 0.8 mm；

使用寿命不小于 5 a；

抗冲击 100g(g 为重力加速度), 11 ms;

平均故障间隔时间(MTBF) 不小于 1 000 h。

承压外管管体机械设计如图 6 所示。

3.1 管体屈服强度校核

实心材料的屈服强度与尺寸无关，空心材料则与管壁厚度尺寸有关，根据材料屈服强度计算关系可知，承压管的屈服强度计算关系如式(1)所示，最大屈服强度如式(2)所示。

$$\sigma = p \times \frac{D^2}{D^2 - d^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{\max} \geq \eta \times \sigma \quad (2)$$

式中 σ 为承压探管材料承受的屈服强度, MPa; σ_{\max} 为承压探管材料承受的最大屈服强度, MPa; D 为承压探管外径, m; d 为承压探管内径, m; p 为承受压强, MPa; η 为安全系数, 值为 1.2~1.5, 一般取 1.3。

承压外管设计尺寸外径 $D=73$ mm, 内径 $d=61$ mm, 长 $H=2600$ m。承压管选择 17-4PH 沉淀型硬化型不锈钢, 弹性模量为 2×10^5 MPa, 泊松比为 0.3, 屈服应力为 355 MPa, 屈服极限为 1180 MPa。承压外管所需承受管外压强 $p=120$ MPa; 校核时安全系数取 $\eta=1.3$ 。

将材料参数代入式(1)、式(2)可得到最大屈服强度 σ_{\max} 应大于 516.99 MPa, 远小于屈服极限 1180 MPa, 校核强度符合要求。

承压管内径尺寸固定(装保温瓶), 校核承压管的外径。所选材料的屈服极限 1180 MPa 应大于 120 MPa 的外压作用在空心管壁所产生的屈服强度值, 由此可根据式(1)、式(2)推导出承压管外径尺寸 D 应超过 65.48 mm。而实际选用 D 为 73 mm, 符合设计要求。

综上所述, 承压管材料、尺寸及相关参数选择是合理的。

3.2 承压管 ANSYS 有限元分析与校核

通过 ANSYS 软件建立承压探管模型, 进行有限元分析。网格采用智能网格划分, 尺寸级别选择 6 级, 智能网格会根据结构表面曲率的突变而自动加密。再选择分析类型为结构静力学分析, 施加载荷就是技术条件 120 MPa, 设定求解参数(总变形、等效应力云、等效应变、最大主应力、最小主应力、方向性、位移安全因子等云图)。总形变云图如图 7 所示, 等效应力云图如图 8 所示。

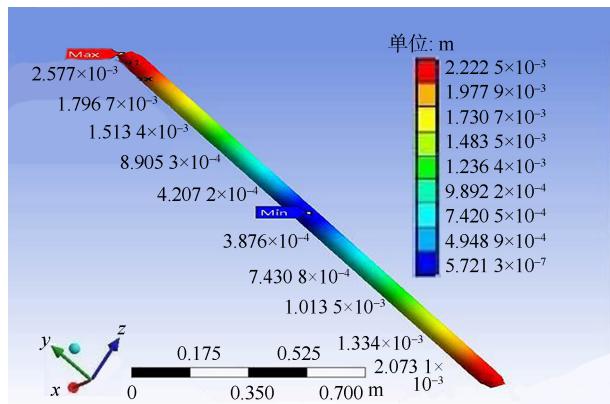


图 7 总形变云图

Fig.7 Total deformation cloud diagram

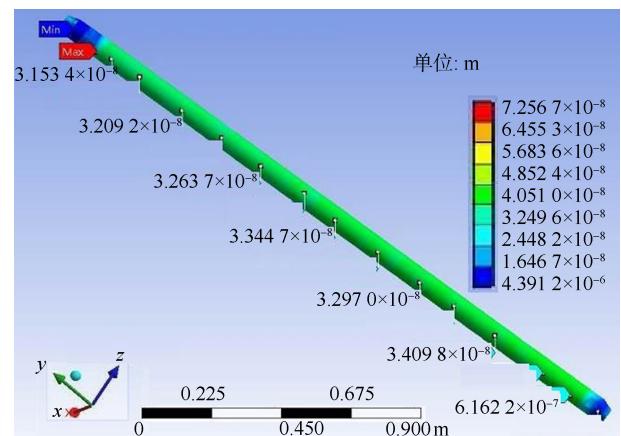


图 8 等效应力云图

Fig.8 Equivalent stress cloud diagram

由图 7 分析, 承压探管两端变形最大, 中间最小, 递减趋势比较明显, 承压探管变形量在 $(2.222 \sim 5.721) \times 10^{-7}$ m 之间, 不影响管内设备弹塑性变形。由图 8 可知探管等效应力在两段最小, 中间次之, 在管体与螺纹接头处最大, 说明此处的应力最大, 安放设备应置于中间位置。分别对最大主应力, 最小主应力, 位移安全因子云图进行分析, 承压探管接头与螺纹连接处应力最大, 变形最大, 安全性最低。分别取承压探管壁厚为 4、5、6、7 mm 四组, 其他参数保持不变, 分析承压探管等效应力、最大等效应力、应力、变形量等值进行比较分析评价, 可得到壁厚为 6 mm 时, 承压探管的内部应力分析为合理, 也满足外界环境条件要求, 这与设计值是一一对应的^[8-11]。

4 保温探管设计

保温探管主要解决在环境温度 270 °C, 工作 4 h, 管内温升小于 80°C。保温探管机械设计图如图 9 所示。由压盖、堵头、隔热管、上吸热体、瓶体、下吸热体构成。保温探管对温度的控制效果是通过温度场与压力场进行耦合分析和 ANSYS 软件校核, 确保设计的合理性。

4.1 温度场分析计算

保温探管的温度场主要考虑瓶口的轴向导热(内管壁、隔热塞), 内外管之间的辐射漏热、残余气体的导热以及真空层间的固体传热。忽略真空层间的固体传热, 设内管壁导热功率为 Φ_1 , 隔热塞漏热功率为 Φ_2 , 辐射漏热功率为 Φ_3 , 残余气体漏热功率为 Φ_4 , 总漏热功率为设为 Φ 。

取温差 $\Delta T=200$ K, 材料导热系数 $\lambda=16.6$ W/(m·K), 导入工程热物理学计算关系式, 可计算 $\Phi_1=1.976$ W, $\Phi_2=0.119$ W, $\Phi_3=1.23$ W, 当真空中压强大于 10^{-3} Pa 时, 残余气体漏热可以忽略, $\Phi_4=0$ 。

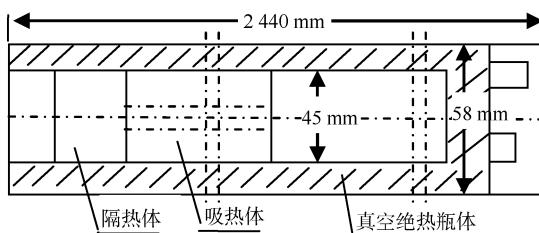


图 9 保温探管图
Fig.9 Thermal insulation diagram

总漏热功率如式(3)所示。

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 3.325 \quad (3)$$

蓄热体长度为 400 mm, 经计算保温探管蓄热能量 $Q = 90.432 \text{ kJ}$ 。由此可计算保温时间 t , 如式(4)所示。

$$t = \frac{Q}{\Phi} = \frac{90432(\text{J})}{3.325(\text{W})} = 27825 \text{ s} = 7.7 \text{ h} \quad (4)$$

实际中要求蓄热体在保温时间 4 h 内满足温升小于 80℃, 由式(4)计算可知在 7.7 h 内都能达到要求。实际上传入保温瓶内的热量不可能立即全部被保温瓶贮存, 所以设计留有足够的余量。

4.2 温度场与压力场耦合 ANSYS 有限元校核

保温探管结构温度变化, 由于热胀冷缩产生变形, 若变形受到某些限制, 如位移受到约束或施加相反对力, 则在结构中产生热应力。在 ANSYS 软件中采用顺序耦合, 即先做一个稳态热分析, 再做静力结构分析。稳态热分析: 建立热稳态模型, 施加热载荷, 查看校核数据; 静力结构分析: 把单元类型转换成结构单元, 定义包括热膨胀系数在内的结构材料属性, 施加包括从热分析得到的温度在内的结构载荷, 求解并校核。

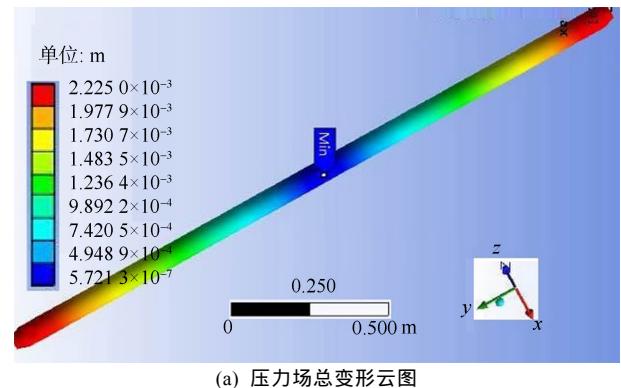
施加温度边界条件: 温度 270℃, 求解温度场, 并将温度场结果导入静力学结构分析; 施加载荷 30 MPa 进行约束。得到校核数据如图 10 所示, 图 10a 为压力场总变形云图, 总变形约 $5.7 \times 10^{-7} \sim 2.2225 \times 10^{-3} \text{ m}$; 图 10b 为压力场与温度场耦合总变形云图, 总变形约 $8.7 \times 10^{-7} \sim 3.4792 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。

由图 10 分析可得, 采用分体结构设计, 在高温高压下, 承压管的总变形量增大, 等效应变增大; 最大变形量增大 56% ($(0.0031792 - 0.002225) / 0.002225$), 应变增加 56%, 应力增加 56%, 承压管最大屈服强度 516.99 MPa, 增大 56%, 为 806.52 MPa, 小于材料屈服极限 1180 MPa。温度场与压力场的耦合分析的结果可知, 承压管的设计是科学合理的^[12-15]。

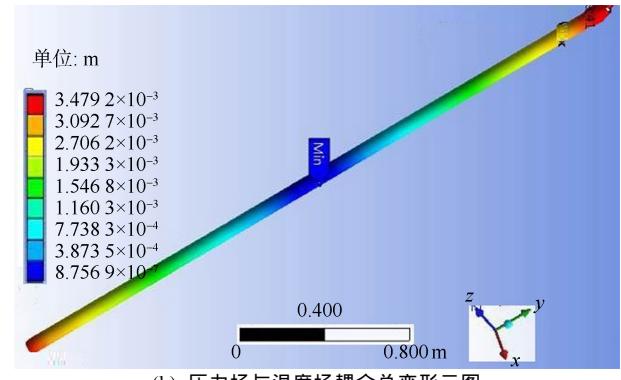
5 系统实际测试

5.1 井深与温度测试

通过仪器存储的数据和仪器到达井底的时间对



(a) 压力场总变形云图



(b) 压力场与温度场耦合总变形云图

图 10 形变云图
Fig.10 Deformation diagram

应关系, 测得该井井底 3700 m 处的温度为 207℃, 加上技术性停待, 实际测量时间超过 4 h。取样频率为 1 点/10 s, 取得了测温原始数据 15427 组; 温度测量单元由 9℃ 上升至 207℃, 温升 198℃, 测得井底温度为 207℃。将井深与井底温度对应, 得到如图 11 的井深-井温的连续测量曲线。

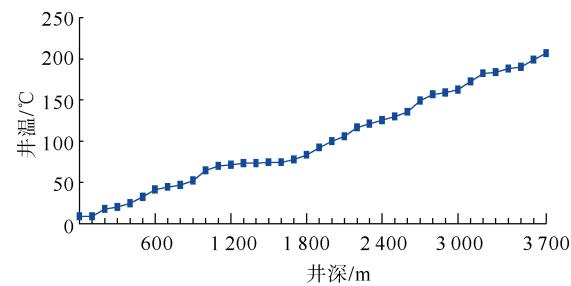


图 11 耐高温测试图

Fig.11 High temperature test diagram

仪器取回地面后, 存储卡数据完整记录所测数据, 元器件稳定工作, 说明机芯软件硬件设计符合高温环境, 保温瓶和承压管设计达到预期技术指标。

5.2 姿态参数测试

现场测试姿态参数, 测量数据如表 3 所示。由于该井没有其他测斜数据参比, 采用通过两次测试

数据比较,可以看出仪器测量的倾角结果重复性较好,在0.2°之内,方位角数据在顶角小于3°时的误

差是比较大的,在倾角大于3°时,方位角上测与下测的偏差在2.5°范围内。

表3 方位角和倾角实测值
Table 3 Measured values of azimuth and inclination

测点深度/m	第1次测量值/(°)		第2次测量值/(°)		差值/(°)	
	倾角	方位角	顶角	方位角	顶角差	方位角差
100	0.16	289.04	0.05	122.74	-0.11	193.70
200	0.20	294.07	0.26	122.30	0.06	188.23
300	0.28	315.16	0.42	121.75	0.14	166.59
400	0.18	59.88	0.06	121.53	-0.12	61.65
500	0.26	116.68	0.17	118.52	-0.09	1.84
600	1.92	304.59	1.89	302.83	-0.03	-1.76
700	2.33	306.10	2.34	308.83	0.01	2.73
800	1.81	306.91	1.71	307.64	-0.10	0.73
900	1.91	307.84	1.80	309.36	-0.11	1.52
1 000	3.26	309.60	3.23	308.26	-0.03	-1.34
1 100	3.19	308.17	3.10	309.20	-0.09	1.03
1 200	1.12	308.49	0.95	306.61	-0.17	-1.88
1 300	0.82	309.33	0.80	304.87	-0.02	-4.46
1 400	0.88	310.44	0.85	314.21	-0.03	3.77
1 500	1.42	313.39	1.50	314.51	0.08	1.12
1 600	3.39	321.47	3.27	320.04	-0.12	-1.43
1 700	2.48	323.05	2.52	320.77	0.04	-2.28
1 800	0.71	318.58	0.69	318.36	-0.02	-0.22

6 结论

a. 针对目前钻孔轨迹测量存在耐高温高压性能差、稳定性差、应用范围较窄等不足之处,在设备机芯测量模块上选用耐高温等高新技术产品作为其测量元件,采用间歇供电技术以减小能耗和散热。在设备外形结构上,采用新材料设计承压外管和保温探管,并利用ANSYS有限元分析软件对设计的承压外管结构进行强度校核,对保温探管进行温度场与压力场耦合分析。

b. 研制的高温钻孔测斜仪能在环境温度280°C、压强120 MPa的条件下工作;倾角范围0°~90°,精度小于0.5°,方位角测量范围0°~360°,精度小于2.5°;温度范围和精度分别为0~300°C,(±1)°C;不受磁性干扰,消除了机械框架陀螺测斜仪的累计误差,提高了测量精度;并解决了供电节能和数据存储等问题,具有应用价值。

参考文献

- [1] 屈召贵,龚名茂,汪光宅. 基于MEMS陀螺传感测斜仪研制[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(2): 143-146.
QU Zhaogui, GONG Mingmao, WANG Guangzhai. Development of MEMS-based gyro sensor inclinometer[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(2): 143-146.
- [2] 王岚. 存储式随钻测斜仪的研制[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(3): 79-80.
WANG Lan. The development of the storage type inclinometer with drilling[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(3): 79-80.
- [3] 周策,王瑜,刘一民,等. 地质超深钻孔自寻北陀螺测斜仪研制[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(3): 36-40.
ZHOU Ce, WANG Yu, LIU Yimin, et al. Geological ultra-deep drilling trouble developed north gyroscopic inclinometer[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling Engineering), 2014, 41(3): 36-40.
- [4] SOCOLOW A V, KRASNOV A A, STAROSEL'TSEV L P, et al. Development of a gyro stabilization system with fiber-optic gyroscopes for an air-sea gravimeter[J]. Gyroscopy and Navigation, 2015, 6(4): 338-343.
- [5] SEDLAK V. Magnetic pulse method applied to borehole deviation measurements[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1994, 39(1): 61-75.
- [6] 张成浩. 基于MEMS-IMU寻北定向技术研究[D]. 北京:北京理工大学, 2015.
- [7] 屈召贵,龚名茂. 存储式测斜仪的研制[J]. 微型机与应用, 2016, 35(11): 37-39.
QU Zhaogui, GONG Mingmao. Research and development of storage inclinometer whiled rilling[J]. Microcomputers and Applications, 2016, 35(11): 37-39.
- [8] 雷晓荣. 回转钻进随钻测斜仪的研制及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(3): 118-121.

- LEI Xiaorong. Rotary drilling of development and utilization of inclinometer[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2015, 43(3): 118–121.
- [9] 武俊兵. 基于 MEMS 陀螺仪的寻北定向关键技术研究及其系统实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [10] 周策, 罗光强, 李元灵, 等. 超高温高压地层钻孔测斜仪研制及应用[J]. *西部探矿工程*, 2017, 29(5): 93–97.
- ZHOU Ce, LUO Guangqiang, LI Yuanling, et al. Development and application of drilling inclinometer for ultra-high temperature and high pressure formation[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2017, 29(5): 93–97.
- [11] 周策, 罗光强, 李元灵, 等. GRY-1 型超高温干热岩地层钻孔测斜仪研制及应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2017, 44(4): 44–48.
- ZHOU Ce, LUO Guangqiang, LI Yuanling, et al. Development and application of GRY-1 type hyperthermal hot rock formation borehole inclinometer[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2017, 44(4): 44–48.
- [12] 于小波, 杨超. 随钻井斜监测预警系统研究[J]. *石油机械*, 2011, 39(3): 47–49.
- YU Xiaobo, YANG Chao. Along with the drilling inclined monitoring and early warning system research[J]. *Petroleum Machinery*, 2011, 39(3): 47–49.
- [13] 卜继军, 魏贵玲, 李勇建, 等. 陀螺寻北仪二位置寻北方案[J]. *中国惯性技术学报*, 2002, 10(3): 47–50.
- BU Jijun, WEI Guiling, LI Yongjian, et al. Two-position detecting scheme for gyro-based north seeker[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2002, 10(3): 141–143.
- [14] 翁海诠, 任春华, 张敬栋, 等. 基于最小分辨率的 MEMS 陀螺漂移抑制方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(10): 2371–2372.
- WENG Haiquan, REN Chunhua, ZHANG Jingdong, et al. Study on a method of decreasing the drift of MEMS gyroscope based on minimum resolution[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(10): 2371–2372.
- [15] 屈召贵, 刘强. 基于北斗卫星的航行数据导航方法研究[J]. *舰船科学技术*, 2016, 38(4): 145–147.
- QU Zhaogui, LIU Qiang. Research on voyage data navigation method based on the beidou satellites[J]. *Ship Science and Technology*, 2016, 38(4): 145–147.

(责任编辑 聂爱兰)

(上接第 200 页)

- [11] 高振宅. BEAM 地质超前预报系统在锦屏引水隧洞 TBM 施工中的应用[J]. *铁道建筑技术*, 2009(11): 65–67.
- GAO Zhenzhai. The application of the BEAM geological advance prediction system for the TBM construction of the Jinping diversion tunnel[J]. *Railway Construction Technology*, 2009(11): 65–67.
- [12] 刘志民, 刘希高, 张金涛, 等. 交流聚焦激电法煤巷超前探测阻容试验模拟[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(9): 2144–2151.
- LIU Zhimin, LIU Xigao, ZHANG Jintao, et al. Experimental simulation of resistance-capacitance model for advanced detection in coal roadway based on alternating current focusing induced polarization method[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(9): 2144–2151.
- [13] 张金涛, 吕一鸣, 刘志民, 等. 聚焦双频激电法超前探水激励信号发送系统设计[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(8): 107–111.
- ZHANG Jintao, LYU Yiming, LIU Zhimin, et al. Design on advanced water detection excitation signal transmission system of focusing double frequency induced polarization method[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(8): 107–111.
- [14] 汤井田, 戴前伟, 柳建新, 等. 何继善教授从事地球物理工作 60 周年学术成就回顾[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(9): 2323–2339.

- TANG Jingtian, DAI Qianwei, LIU Jianxin, et al. Academic achievements of Professor HE Jishan dedicated to geophysics for six decades[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(9): 2323–2339.
- [15] 王爱霞, 高国棉, 周九茹. 有限长均匀带电直线电场的对称性分析与计算[J]. *大学物理*, 2015, 34(10): 17–19.
- WANG Aixia, GAO Guomian, ZHOU Jiuru. Calculation and symmetrical analysis of electric field of a finite line with even charge[J]. *College Physics*, 2015, 34(10): 17–19.
- [16] 刘志民, 韩雷, 张伟杰, 等. 煤巷多点电流源双频激电法超前扫描探测技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(4): 149–156.
- LIU Zhimin, HAN Lei, ZHANG Weijie, et al. Study on advanced scanning detection technology of dual-frequency induced polarization method with multi-point current sources in coal mine roadway[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(4): 149–156.
- [17] 廖仁忻, 徐志和. 用高斯定理求解电力线方程[J]. *大学物理*, 1993, 12(7): 14–15.
- LIAO Renxin, XU Zhihe. Solving the power line equation with Gauss theorem[J]. *College Physics*, 1993, 12(7): 14–15.

(责任编辑 聂爱兰)