

# 大深度钻孔测量仪器隔热复合保温承压管 设计关键技术

周策<sup>1</sup>, 罗光强<sup>1</sup>, 韩锐<sup>2</sup>, 赵燕来<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川成都 611734; 2. 安徽万瑞冷电科技有限公司, 安徽合肥 230088)

**摘要:** 本文介绍的“大深度隔热复合保温承压管”主要解决超高温高压环境钻孔测量仪器耐高温高压问题。任务目标是攻克超高温高压环境下真空绝热保温、高水压密封分析校正等设计关键技术, 研制出具有自主知识产权的大深度隔热复合保温承压管, 使用环境温度可达 260 °C, 环境压力 130 MPa, 保持真空绝热保温瓶内 8 h 温升 < 80 °C, 通过在地热钻探工程、干热岩钻探工程、科学钻探工程、深部矿产资源勘探和深部油气资源勘探等工程中的应用, 拓展应用领域, 进一步提升仪器性能指标。试制的承压外管及保温瓶进行了高温高压试验, 试验结果表明承压外管高温高压同时作用环境下工作是可靠的, 保温瓶的保温能力亦能达到技术要求, 证明该设计方法是合理的。

**关键词:** 深部钻探; 钻孔测量仪器; 高温高压; 承压管; 吸热体; 密封圈

中图分类号: P634.3 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2021)S1-0343-06

## Key technology for design of compound insulation pressure-resistant housing of broehole measuring instrument for deep drilling

ZHOU Ce<sup>1</sup>, LUO Guangqiang<sup>1</sup>, HAN Rui<sup>2</sup>, ZHAO Yanlai<sup>1</sup>

(1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China;

2. Companies of Wan Rui Cold Electricity Science and Technology Limited, Hefei Anhui 230088, China)

**Abstract:** The compound insulation pressure-resistant housing for deep drilling is designed mainly to solve the problem with the survey tool in extremely heat temperature high pressure environment. The mission target is to overrun extremely high pressure environment to descend vacuum unique hot heat preservation, high the water pressure seal completely analysis to correct etc. design key technique, develop to submit to have independence intelligent property right of the big depth separate hot compound the heat preservation accept to press tube, use the environment temperature can reach to 260 °C, the environment pressure 130 MPa, keep vacuum unique hot the 8 h in the thermos bottle < 80 °C, pass the engineering Application in the subterranean heat the ability drill explore, dry heat rock drill explore, science drill explore, deeply the department the mineral resources investigate explore and deeply the department the oil the spirit the resources investigate explore etc. expand application realm, further promote instrument function index sign. Accept to press outside tube and thermos bottle carried on heat high pressure to experiment, Experiment result enunciation accept to press outside tube heat high pressure environment bottom work is credibility, The heat preservation ability of the thermos bottle as well the ability attain a technique a request, Certificate should design method is reasonable.

收稿日期: 2021-05-31 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.S1.057

**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“深海钻探技术与工程支撑(中国地质科学院探矿工艺研究所)”(编号: DD20190587)、“青海共和盆地干热岩调查评价与勘查示范(中国地质科学院探矿工艺研究所)”(编号: DD20201104)

**作者简介:** 周策, 男, 汉族, 1965年生, 教授级高级工程师(三级), 探矿工程专业, 主要从事探矿工程及地质灾害防治技术仪器仪表的研发工作, 四川省成都市郫县成都现代工业港北区港华路 139 号, 449730588@qq.com。

**引用格式:** 周策, 罗光强, 韩锐, 等. 大深度钻孔测量仪器隔热复合保温承压管设计关键技术[J]. 钻探工程, 2021, 48(S1): 343-348.

ZHOU Ce, LUO Guangqiang, HAN Rui, et al. Key technology for design of compound insulation pressure-resistant housing of broehole measuring instrument for deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1): 343-348.

**Key words:** deep drilling; broehole measuring instrument; HTHP; pressure-resistant housing; heat absorption body; "O" ring

## 0 引言

目前应用于深海、地热、石油、天然气等多种地下钻井环境的电子测量仪器<sup>[1-5]</sup>,一般使用温度都在120℃以内。为实现国家向地球深部开发的战略目标,以研究钻孔环空温度高达260℃,环空井压130 MPa,埋深10000 m大深度地层<sup>[6-10]</sup>的钻孔测量技术为导向,采用适用于大深度高温地层的钻孔测量仪<sup>[11-13]</sup>的先进真空无磁隔热承压探管技术及结构<sup>[14-15]</sup>,研制了在大深度地层中既能保证质量又能保证安全的大深度隔热复合保温承压管,并配套相

应的安装、测试工艺技术方法<sup>[16]</sup>,通过第三方测试,提供适用于大深度隔热复合保温承压管设计关键技术设计方法、测试工艺技术。解决了钻孔温度高达260℃,井压130 MPa,埋深10000 m高温高压大深度隔热复合保温承压管设计关键技术难题<sup>[17-18]</sup>。

## 1 耐温耐压保温承压复合管的结构

耐温耐压保温承压复合管的结构组成见图1。其结构主要包括:上捞头、上接头、密封圈、隔热体、上吸热体、无磁保温瓶、无磁承压管、下吸热体、密封圈、下接头。

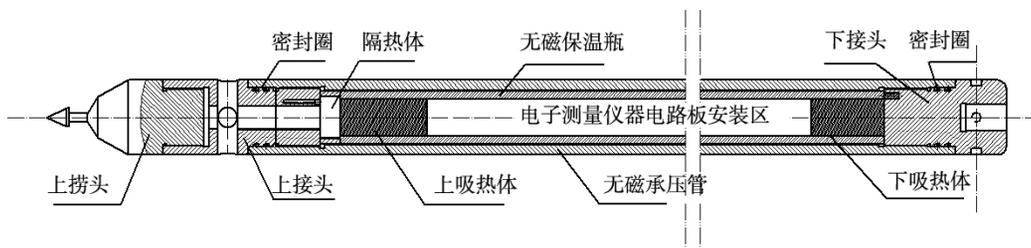


图1 耐温耐压保温承压复合管的结构

电子测量仪器电路板探管放置于无磁真空隔热保温瓶外管内,无磁真空隔热保温瓶外管置于无磁承压外管内。通过钢丝绳连接上捞头、直接投入或者捞矛头打捞上捞头的方式下放测量仪器探管;安装了电子测量仪器电路板探管的耐温耐压保温承压复合管测量仪,耐高温、耐高压,可以实现0~260℃高温、130 MPa高压环境条件下保持真空绝热保温瓶内8 h温升<80℃,达到耐温耐压保温承压复合管内电子测量仪器电路板探管不受进行环空高温高压的干扰影响。

## 2 无磁承压外管设计核算

### 2.1 核算依据

承压管壁厚的理论计算<sup>[14-16]</sup>,由于受钻孔尺寸的限制,根据承压管内、外径以及适当间距要求,且保证足够的耐压强度,根据第三强度理论条件(最大剪应力条件)承压外管壁厚计算如公式(1)所示。

$$L_Q = n \cdot (a^2 + b^2) \cdot P_z / (b^2 - a^2) \quad (1)$$

式中: $L_Q$ ——应力,MPa; $L_{Qmax}$ ——需用应力=屈服,MPa; $b$ ——外径,mm; $a$ ——内径,mm; $P_z$ ——承压力,MPa; $n$ ——安全系数。随着温度的增高材料屈服强度在降低,关键是在高温300℃时,其承压外管持久强度能否保证足够的耐压强度。

### 2.2 承压外管材材料

众所周知很多电子测量仪器对磁干扰都有影响,因此选择TC11无磁钛合金管。

工作温度:500℃;密度:4.51 g/cm<sup>3</sup>;

室温力学性能(25℃):(1)抗拉强度 $\sigma_b > 1030$  MPa;(2)规定残余伸长应力 $\sigma_r 0.2 \geq 900$  MPa;(3)伸长率 $\delta_5 \geq 10\%$ ;(4)断面收缩率 $\psi \geq 30\%$ ;

高温力学性能(500℃):(1)抗拉强度 $\sigma_b > 685$  MPa;(2)持久强度 $\sigma_{100h} \geq 640$  MPa;(3)耐磨性比较TC11合金在25℃时抗磨损性能较差,而在600℃时抗磨损性能较好。

### 2.3 承受外压管材尺寸及相关参数选择

可根据需求选取,本项目选择:外径73 mm,内

径 52 mm,安全系数  $n=1.5$ ,承受外压<sup>[1]</sup> $P_z=130$  MPa。

### 2.4 承受外压管验算

将2.3选择参数值代入公式(1)

$$\text{则有 } L_Q = (73^2 + 52^2) \times 130 \times 1.5 / (73^2 - 52^2) = 596.7 \text{ MPa}$$

所以即使在高温力学性能(500℃),持久强度  $\sigma_{100h} \geq 640$  MPa。

$$L_{Q_{\max}} = \sigma_{\max} = 640 \text{ MPa} > 596.7 \text{ MPa}。$$

这就表明了低于500℃时验算合格。

### 2.5 TC11材料高温300℃抗拉强度测试

TC11钛合金材料生产加工工艺较复杂,各厂家批次虽然成分一致,但强度测值变化较大,我们对实际选用购置的TC11钛合金作抗拉强度测试,在300℃时,测得屈服强度仅仅达到631 MPa,虽然比2.4中手册指标  $L_{Q_{\max}} = \sigma_{100h} \geq 640$  MPa小,但仍然大

于2.3计算值  $L_Q=596.7$  MPa,也表明这个批次的TC11钛合金满足使用要求。

## 3 保温瓶温度场分析计算

本项目选择保温瓶的:外径  $D=51$  mm,内径  $d=36$  mm,长  $L=1970$  mm;隔热体长度  $L=400$  mm,外径  $d_2=51$  mm,内径  $d_1=48$  mm。

### 3.1 保温瓶、吸热体设计

保温瓶<sup>[14]</sup>设计图,选用无磁钛合金材料,吸热体材料综合后选用大比热固态石蜡,见表1,由于保温瓶内空间尺寸的限制,吸热体空间尺寸的限制,那么在单位体积时间内材料吸热后的温升就值得考虑了,为此我们引入单位时间体积的导热密度比热温升 $[\text{℃}/(\text{s}\cdot\text{mm}^3)]$ ,可以对吸热材料的吸热温升情况进行比对,固态石蜡  $0.187 \text{℃}/(\text{s}\cdot\text{mm}^3)$ 最小,所以选择石蜡作为吸热体材料,保温瓶设计见图2。

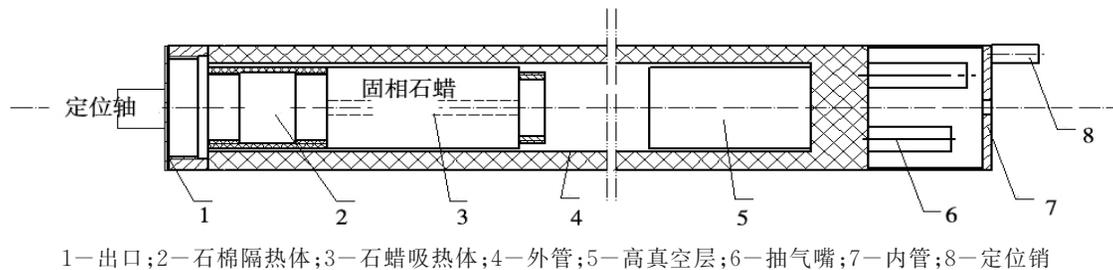


图2 保温瓶设计结构

表1 常用物质的密度-比热-导热系数

相态	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	比热/ [ $\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{℃})^{-1}$ ]	导热系数/ [ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ ]	单位体积时间的温升/ [ $\text{℃}\cdot(\text{s}\cdot\text{mm}^3)^{-1}$ ]	是否 选择	备注
条件	15.6~21℃	15.6℃				
石蜡	固 0.86~0.91	2.6	0.12	0.187	是	
软木	固 0.25	2.01	0.17	1.218	否	
石棉	固 1.5	1.34	0.15~0.37	0.4657	否	
不锈钢300系列	固 8.04	0.5	17	15.224	否	
硫化橡胶	固 1.10	1.74	0.19~0.26	0.4232	否	不耐高温
固体沥青	固 1.1~1.5	0.92~1.67	0.7	1.497	否	
玻璃棉	固 0.072	0.66	0.5~1.0	56.818	否	

注:单位时间体积的导热密度比热温升 $[\text{℃}/(\text{s}\cdot\text{mm}^3)] = 3.6 \times \text{导热系数}/\text{比热}/\text{密度}$

### 3.2 漏热计算公式

保温瓶<sup>[14]</sup>的漏热<sup>[16]</sup>即由外及内的热量传递,为便于计算,将有影响的漏热分析如下:

(1)通过保温瓶口的轴向传热,包括内管壁、隔

热体、吸热体的固体导热;

(2)通过保温瓶筒体的传热,包括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。

将保温瓶热量由外而内传入的单位时间内的全部热量,即总漏热流量设为 $\Phi_{\text{总}}$ , $\Phi_1$ 为内壁导热, $\Phi_2$ 为隔热体漏热, $\Phi_3$ 为辐射漏热, $\Phi_4$ 为残余气体漏热,真空层间的固体传热忽略。

$$\text{则: } \Phi_{\text{总}} = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4$$

$$\text{内管壁导热公式: } \Phi_1 = \frac{A}{l} \cdot \bar{\lambda} \cdot \Delta T$$

式中: $A$ ——有效截面积, $A = \frac{\pi}{4} \times (d_2^2 - d_1^2)$ 。

保温瓶内管长度 $L = 1870$  mm, 外径 $d_2 = 51$  mm, 内径 $d_1 = 36$  mm。隔热体长度 $l = 150$  mm, 外径 $d_2 = 36$  mm, 内径 $d_1 = 28$  mm。

### 3.3 导热段长度

$\Delta T$ : 温差取值 $\Delta T = 200$  K

$\bar{\lambda}$ : 材料平均导热系数。取 $\bar{\lambda} = 16.6$  W/(m·K), 经计算 $\Phi_1 = 1.976$  W。

$$\text{隔热体漏热公式: } \Phi_2 = \frac{S}{l} \cdot \bar{\lambda} \cdot \Delta T$$

式中: $S$ ——隔热体截面积,其余同上,取 $\lambda = 0.045$  W/(m·K), 经计算 $\Phi_2 = 0.119$  W。

辐射漏热计算:

$$\Phi_3 = \sigma_0 \cdot A \cdot \left[ (T_1)^4 - (T_2)^4 \right] \cdot \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \cdot \epsilon_2} \cdot \frac{1}{n + 1}$$

式中: $\sigma_0$ ——黑体辐射常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>); $A$ ——辐射面积; $\epsilon_1, \epsilon_2$ ——有效辐射系数,这里 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.08$ ;  $T_1, T_2$ ——高低温表面的温度,此处选 $T_1 = 533.15$  K,  $T_2 = 333.15$  K;  $n$ ——层数,此处按1层计算。

经计算 $\Phi_3 = 1.23$  W。

残余气体漏热:

$$\Phi_4 = Ka P (T_1 - T_2) \cdot A$$

$$K = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{R}{8\pi MT}}$$

式中: $a$ ——气体分子在 $T_1, T_2$ 表面总的适应系数; $P$ ——气体压力,Pa; $A$ ——辐射面积; $T_1, T_2$ ——高低温表面的温度,K,当真空度 $> 10^{-3}$  Pa时,可以忽略残余气体漏热。

按隔热体长度 $L = 150$  mm, 外径 $d_2 = 36$  mm, 内径 $d_1 = 28$  mm。综合上述计算结果可知:

$$\Phi_{\text{总}} = 3.315$$
 W

### 3.4 吸热体蓄热量计算

吸热体石蜡是利用其物理性能,即它的显热和

潜热来储存热量,将温度变化控制在可允许的范围之内。

吸热体蓄热量的计算: $Q_{\text{蓄}} = Q_{\text{显}} + Q_{\text{潜}}$

根据前面总漏热量的计算以及保温瓶内允许的最大蓄热体积,选取比热较大的吸热体蓄热材料石蜡,计算吸热体在许可的变温范围内的总蓄热量,验证是否满足一定时间内的保温要求。

我们选取的吸热体长度为420 mm,经计算 $Q_{\text{蓄}} = 113.04$  kJ,除以总漏热流量 $\Phi_{\text{总}}$ 可知 $t = 113.04 / (3.315 \times 3.6) = 9.472$  h,即理论上,吸热体在保温时间8 h内,能满足 $\Delta T \leq 80$  °C。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,设计应有足够余量。

## 4 承压密封设计

由于承压外管面临着超高温高压的工作环境,根据设计指标,其承压外管将在最长工作时间8 h内承受最高达130 MPa的压强和260 °C的高温。密封性能决定了测量仪器系统的可靠性与稳定性,钻孔内恶劣的工作环境对钻孔测量装置的密封技术提出了非常高的要求,通过密封性计算和渗流模型的建立,指导设计密封方式和措施,提出了加装双O型密封件和材料膨胀自密封的2种措施,显著提高了仪器系统的密封性能。

### 4.1 O型橡胶密封圈计算选型

为了减少因机械加工时的精度误差、长时间工作磨损导致密封接触面的破坏对仪器整机密封效果的影响,本承压管采用了2种外部辅助措施来提高仪器系统的密封性能和安全系数。

(1) 双O型橡胶密封圈。O型密封圈是具有圆形截面的环行橡胶密封圈,主要用于管状机械部件在静态条件下防止液体或气体介质的泄露。O形密封圈能发挥密封性能的主要原因是它具有良好的变形性能,在一定压力下能补偿间隙。密封圈的材料有天然橡胶、丁苯橡胶、氟橡胶、全氟橡胶等,不同的材质有着不同的温度极限和物理性能。全氟橡胶材料密封构件在航空航天领域、地质钻探工程和深海探测等工作环境较为恶劣的领域下具有广阔的应用前景。

由于本仪器装置在超高温高压的工作环境下,承压探管优先选用耐热性好、抗撕裂力强的全氟橡胶作为密封器件,实物照片如图3所示。全氟橡胶

密封圈可以弥补承压探管的加工精度、拧卸磨损、其他外力破坏等因素造成泄露,提高承压探管密封的安全系数。另外,全氟橡胶密封圈在一定压力的环境下,有部分变形能力,可以适当补偿接头位置的空间间隙,特别是全氟橡胶密封圈具有优良的耐温、耐压能力。因此,在承压的密封锥面上加设一道全氟橡胶形成双O型密封的设计,可以显著提高密封接触面的密封效果。

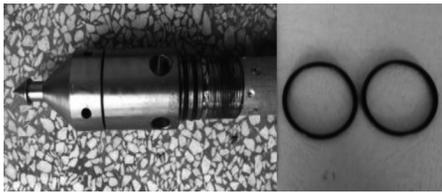


图3 橡胶O型密封圈

(2)材料膨胀实现自密封。承压外管的密封部件由筒体与锥形堵头组成,在仪器下孔之前将筒体和锥形堵头经过一定的预紧力扭紧,然后利用绞车或钻杆放入孔底开始工作。由于本仪器系统将在最高260℃的高温环境下长时间工作,因此需要利用不同材料之间的热膨胀差异实现自密封的效果。选用无磁黄铜与TC11钛合金作的线膨胀系统如表2所示。黄铜硬度比TC11钛合金硬度软,这样在拧螺纹过程中不易卡扣。

本设计选择黄铜作为锥形堵头的材料,选择TC11钛合金作为筒体的材料。由于TC11钛合金

表2 两种材料的线膨胀系数 $\alpha$

材料	线膨胀系数(20~100℃)	硬度(HV)
黄铜	$17.8 \times 10^{-6}$	150
TC11钛合金	$10 \times 10^{-6}$	340~360

的线膨胀系数略小于黄铜的线膨胀系数,因此在相同的温度变化下,锥形堵头的热膨胀量会略大于筒体的热膨胀量,使得密封间隙缩小,从而实现材料膨胀自密封的功能。单种材料的线膨胀量 $l$ 与不同材料的热膨胀量的差值 $\Delta l$ 计算公式为:

$$\begin{cases} l = l_0(1 + \alpha \Delta t) \\ \Delta l = l_0 \Delta t (\alpha_1 - \alpha_2) \end{cases} \quad (2)$$

例如当仪器下放到温度为150℃的工作区域时,与地表温度温差 $\Delta t$ 为125℃(假设地表温度为25℃),本设计中承压探管长度为2680mm,通过式(2)计算得到 $\Delta l = 2.3$ mm,外管半径膨胀量 $\Delta r = \frac{\Delta l_0}{2\pi} = 0.366$ mm。

#### 4.2 密封圈选取

根据温度压力要求,无磁承压外管工作环境温度为260℃,工作压力为130MPa,密封圈要达到此技术要求,须选取全氟橡胶材料DuPontTMKalrez® K#228型O型密封圈,耐高温可达315℃。

### 5 加工试验测试

图4为加工的耐温耐压保温承压复合管。



图4 耐温耐压保温承压复合管

#### 5.1 承压保温管材料高温高压试验

用于承压管的材料除了进行加工调试,还需进行高温高压试验。

通过委托中海油服高温高压试验台对承压保温管进行了温度、压力验证测试。选取255℃高温130MPa压力环境。测试压力130MPa、温度240℃保持30min全程曲线,见图5。

#### 5.2 耐高温保温瓶测试

模拟在超高温环境下的保温瓶温度试验,并取得较好的试验数据。表3是试验用保温瓶及试验测

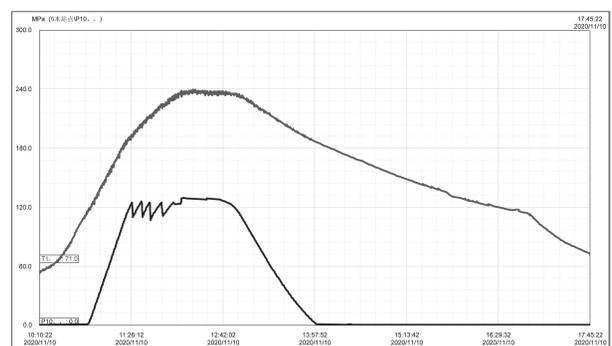


图5 测试压力130MPa、温度240℃保持30min全程曲线

试数据。图6为保温瓶测试台。

表3 测试记录

测试样 件编号	空间温 度/℃	初温/ ℃	2h/ ℃	4h/ ℃	6h/ ℃	8h/ ℃	温 升/℃
2-0930	260	21.2	25.8	43.4	66.66	90.1	68.9
1-0930	260	21.4	24.3	44.44	75.8	101.2	79.8



图6 保温瓶测试台

在环境温度260℃,8h时间后,2只保温瓶内部温升分别为68.9、79.8℃。达到保温性能:环境温度260℃,工作8h,管内温升<80℃。

## 6 结论

根据要求及相关技术规范,对测量仪的承压外管及保温探管机械设计。设计的承压外管结构不仅进行高温持久第三强度理论条件(最大剪应力条件)强度校核,还通过密封材料比对选型,确定了全氟橡胶形成双O型密封;采用TC11管料和接头铍青铜的材料膨胀实现自密封计算,证明强度符合要求,验算合格,无磁承压外管的机械设计是合理的。对保温探管进行温度场分析,引入单位时间体积的导热密度比热温升 $[\text{℃}/(\text{s}\cdot\text{mm}^3)] = 3.6 \times \text{导热系数}/\text{比热}/\text{密度}[\text{℃}/(\text{s}\cdot\text{mm}^3)]$ ,对吸热体材料进行比对选材;通过吸热体蓄热量计算,结果显示保温瓶在高温环境下管内温度的控制能达到设计要求。基于此设计及计算分析结果,进行了承压外管及保温瓶的试制;对试制的承压外管及保温探管进行了高温高压试验,试验结果表明承压管及保温瓶在温度255℃和压力130MPa

同时作用下的环境中工作是可靠的,保温和密封能力达到设计技术要求,证明该设计方法是合理的。

## 参考文献:

- [1] 张伟. 高温岩体热能开发及钻进技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(10): 219-224.
- [2] 王亚芳, 沙荣钧. 石油测井仪用小型保温瓶的研制[J]. 低温与特气, 2002, 20(6): 26-28, 37.
- [3] 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.
- [4] 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 2017, 38(4): 449-459.
- [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] 赵福森, 张凯. 青海贵德ZR1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.
- [7] 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, 4(1): 43-51.
- [8] 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): 173-181.
- [9] 雷翠萍, 黄奇源. 超深井测井突破极限[J]. 国外测井技术, 2003, (2): 45-47.
- [10] BAIRD TOM, FIELDSTROY, DRUMMOND ROBERT, et al. 高温高压(HPHT)测井、射孔和测试[J]. 国外测井技术, 2000(1).
- [11] 姚根顺, 伍贤柱, 孙赞东, 等. 中国陆上深层油气勘探开发关键技术现状及展望[J]. 天然气地球科学, 2017, (8): 1154-1164.
- [12] 汪集场, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 35-31.
- [13] 张春熹, 高爽. 自主式光纤陀螺测斜仪[J]. 仪表技术与传感器, 2006(11): 9-11.
- [14] 韩锐, 章学华, 张俊峰. 一种新型的石油测井用金属保温瓶[J]. 低温与超导, 2005(5): 73-76, 68.
- [15] 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.
- [16] 栾一秀, 郭帅. 高温高压碳氧比测井仪的研制与应用[J]. 国外测井技术, 2011(2): 59-61.
- [17] Jiang YF. Error analysis of analytic coarse alignment methods. [J]. IEEE Transactionson. Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34 (1): 334-337.
- [18] Mortensen RE. Strap down guidance error analysis [J]. IEEE Transactionson Aerospace and Electronic System, 1974, 10(4): 451-457.