

# 耐高温高压复合保温管研究

罗光强<sup>1,2</sup>, 周 策<sup>1,2</sup>, 刘一民<sup>1,2</sup>, 韩 锐<sup>3</sup>

(1.中国地质科学院探矿工艺研究所,四川成都 611734; 2.中国地质调查局地质灾害防治技术中心,四川成都 611734; 3.安徽万瑞冷电科技有限公司,安徽合肥 230088)

**摘要:**耐高温高压复合保温管主要解决超高温高压环境下钻孔测量问题。为攻克超高温高压环境下真空绝热保温、高压密封等关键技术,研究的耐高温高压复合保温管为“超高温钻孔测量仪”提供一种耐高温承压管,使用环境温度可达 270 °C,压力 120 MPa。通过室内测试与现场应用,说明其满足超高温高压要求,可应用于高温地热能钻探工程、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,为超高温大深度钻井测量提供技术支撑。

**关键词:**真空绝热保温瓶;承压管;高温高压密封;测斜仪;钻孔测量;钻探工程

**中图分类号:**P634.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)08-0015-04

**Research on High Temperature and High Pressure Composite Insulation Tube/LUO Guang-qiang<sup>1,2</sup>, ZHOU Ce<sup>1,2</sup>, LIU Yi-min<sup>1,2</sup>, HAN Rui<sup>3</sup>** (1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 2. Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 3. Anhui Wanrui Cold Electricity Technology Co., Ltd., Hefei Anhui 230088, China)

**Abstract:** The high temperature and high pressure composite insulation tubes are mainly used to solve the problem of borehole measurement under the condition of ultra-high temperature and ultra-high pressure. In order to obtain the key technologies such as vacuum heat insulation and high pressure seal in ultra-high temperature and ultra-high pressure environment, the high temperature and high pressure compound insulation tube being developed can provide a high temperature pressure-bearing tube for the ultra-high temperature borehole measuring instrument, which can be used at the temperature of 270°C and pressure of 120MPa. The indoor test and field application show that the compound insulation tube can meet the requirements of ultra-high temperature and ultra-high pressure, can be applied in high temperature geothermal energy drilling engineering, hot dry rock drilling, scientific drilling project, deep mineral resources exploration and deep oil & gas resources exploration, which provides technical support for ultra-high temperature and deep drilling measurement.

**Key words:** vacuum insulated thermos; pressure-bearing tube; high temperature and high pressure seal; inclinometer; drilling measurement; drilling engineering

钻孔测量技术是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。为实现国家新能源开发的战略目标,以超高温大深度钻孔测量为目标,解决超高温大深度地层耐高温高压环境测量问题,研究一套适用于超高温大深度井的钻孔测量,实现 270 °C 高温、120 MPa 压力环境条件下的耐高温高压复合保温管装置,解决超高温高压环境下钻孔测量的恶劣环境难题<sup>[1-5]</sup>。

## 1 耐高温高压复合保温管基本构成

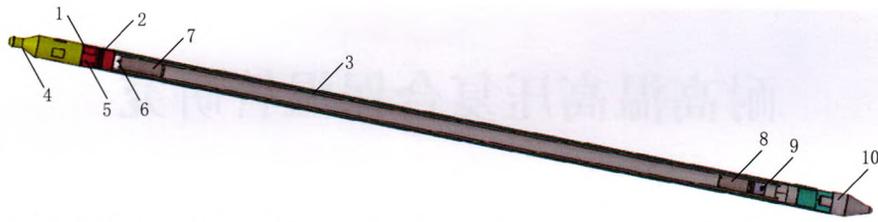
耐高温高压复合保温外管主要由复合承压管、金属保温瓶和全氟密封圈组成。复合承压管主要包括承压管体、密封堵头、打捞头、导向装置;金属保温瓶主要包括瓶体、压盖、堵头隔热管、上吸热体、下吸热体、减震装置。采用真空绝热保温、内部温升吸热控制、耐高温高压密封和承压外管抗压减震导正等关键技术,实现耐温 270 °C、耐压 120 MPa 的功能。

耐高温高压复合保温管基本构成如图 1 所示。

收稿日期:2018-07-01

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);国家公益性行业科研专项“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:罗光强,男,汉族,1988 年生,地质工程专业,硕士,从事地质灾害监测技术、仪器仪表测试控制等相关研究工作,四川省成都市郫都区现代工业港(北区)港华路 139 号,lgq@cgiect.com。



1—复合承压管;2—全氟密封圈;3—金属保温瓶;4—打捞头;5—密封堵头;6—隔热管;7—上吸热体;8—下吸热体;9—减震装置;10—导向装置

图1 耐高温高压复合保温管结构示意图

### 1.1 复合承压管设计

复合承压管的作用是能耐压 120 MPa, 保护仪器, 其耐压由承压管体和密封堵头通过两道径向密封来完成。承压管耐压指标为 120 MPa, 属于超高压应用环境, 对承压外管的耐水压强度要求比较高。但由于受钻井直径影响, 承压外管的外径确定为 73 mm, 而其内径受到内部测斜探管和保温管的影响, 尺寸不得小于 60 mm, 由此留给承压管的壁厚空间仅有 6.5 mm, 不能依靠承压管壁厚的增加来提高其耐水压能力, 只能依靠承压管材料本身的强度增加来满足其耐压能力。

测井仪器用承压外管常用材料有不锈钢 0Cr<sub>18</sub>Ni<sub>9</sub>(304)、沉淀硬化型不锈钢 0Cr<sub>17</sub>Ni<sub>4</sub>Cu<sub>1</sub>Nb(17-4PH)、钛合金 TC<sub>4</sub>、TC<sub>11</sub>等<sup>[6]</sup>, 其机械及力学性能如表 1 所示。

表 1 材料机械性能比较

材料	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}/(N \cdot mm^{-2})$	抗拉强度 $R_m/(N \cdot mm^{-2})$	断后伸长 率 A/%	洛氏硬 度 HRC
304	205	515	≥40	<20
TC <sub>4</sub>	830	895	≥10	30
TC <sub>11</sub>	900	1030	≥10	33
17-4PH	≥1180	≥1310	≥10	35

注: 17-4PH 热处理状态: 1040 ℃ 水或空冷, 480 ℃ 回火 4 h 空冷 (H1025)。

通过上述承压管壁厚条件和上述材料的强度, 进行了初步的强度校核, 其压力校验计算公式如式 (1) 所示。

$$\sigma_{\max} \geq \sqrt{3} \frac{D^2}{D^2 - d^2} nP \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{\max}$ ——承压管材料屈服强度, MPa;  $D$ ——承压管外径, mm;  $d$ ——承压管内径, mm;  $P$ ——承受外压, MPa;  $n$ ——安全系数, 值为 1.2~1.5, 一般取 1.3。

经过计算, 承压管的屈服强度为 832.70 N/mm<sup>2</sup>。比较上述几种材料屈服强度, 可以得出材料

304 的屈服强度太小, 承压达不到要求, 钛合金和沉淀不锈钢承压方面都可以满足要求。经过材料成本、加工性能以及强度等方面的综合比较, 最终选择了强度更高的 17-4PH 作为承压管的加工材料。

### 1.2 金属保温瓶设计

金属保温瓶的作用是减少来自外部的热传导和吸收内部机芯热量, 以确保其内部温度在仪器工作的允许温度范围内, 主要是通过真空绝热保温、内部温升吸热体控制实现。

金属保温瓶之所以可以长时间耐高温, 主要依赖两个方面: 一是良好的绝热性能, 真空绝热保温技术; 二是吸热体的蓄热可以吸收足够的蓄热量。

金属保温瓶主要由保温瓶体、压盖、堵头、隔热管、上吸热体、下吸热体、减震装置等组成, 这些组件的选材、尺寸设计、安装位置等等都可能影响保温瓶的保温效果。

金属保温瓶瓶体采用类似保温杯的内外壳体材料 1Cr<sub>18</sub>Ni<sub>9</sub>Ti, 该材料热传导系数低 [20 W/(m·K)], 材料弹性模量较高 (286000 MPa), 且材料采用抽真空结构, 保温瓶瓶体是保温装置的核心部件, 可以保证高温环境下测斜仪正常的基础。吸热体有上、下两部分, 主要以石蜡 (相变温度 60 ℃, 密度 900 kg/m<sup>3</sup>) 为制作材料, 通过固-液相转变, 实现吸热过程, 其尺寸与选材主要根据测斜仪内部机芯发热情况、持续工作时间与外界环境温度来确定。隔热管选用 SiO<sub>2</sub> 纤维增强气凝胶材料, 其导热系数较低 [0.017 W/(m·K)]。

金属保温瓶的漏热主要是通过瓶口的传热, 及通过隔热管与管壁之间的传热; 蓄热主要是通过固液之间的转换, 利用材料的物理性能来储存热量, 将保温瓶内的温度控制在一定的范围内, 根据计算公式可以确定最优的吸热体尺寸长度。

## 2 耐高温高压复合保温管密封设计

耐高温承高压密封技术是确保仪器下井不被压坏、不会因密封泄露进水而损坏的关键,主要是通过选用强度较高的材料进行加工、密封的设计以及耐高温密封圈来保证的。

根据流体力学渗流模型,轴向的微小渗漏公式:

$$Q = \frac{\pi d h^3}{12 \mu L} \Delta p \quad (2)$$

式中:  $Q$ ——渗流量;  $d$ ——管壁内径;  $h$ ——缝隙的厚度;  $\Delta p$ ——缝隙两侧的压力差;  $\mu$ ——泥浆的粘度;  $L$ ——裂缝缝隙的长度。

根据上述密封性理论与计算,可以采用改变承压探管密封接触面的形状增强其密封性能。将密封接触面设计为双凹槽的密封形式,双凹槽的密封形式可以增加裂缝缝隙的长度  $L$ ,这样可以显著降低渗流量  $Q$ ,如图 2 所示。

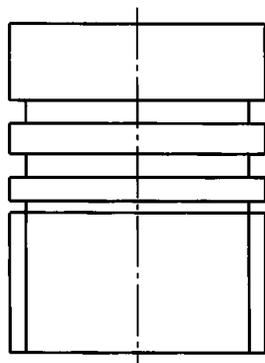


图 2 双凹槽的密封形式

双凹槽的密封形式不仅能增强密封处的机械强度,还可以通过两道密封圈进行自补偿,但其对管体与端头的加工精度要求较高。在严格密封沟槽设计的同时,也通过减少密封环节来进一步提高密封的可靠性,承压管按照常规一般是用管材进行加工,管子为通管,至少有 2 处需要密封,本仪器的承压管设计为盲管,只有 1 端需要密封,加工采用的是棒料镗孔的方式,由于长度较长,其加工难度有所增加,但密封的可靠性有所提高。

同时,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,本仪器系统采用了 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) 在密封接触面加装 O 形橡胶密封圈,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、氟橡胶和全氟橡

胶等等,不同的材质有着不同的温度极限和物理性能<sup>[7]</sup>,见表 2。

表 2 橡胶密封圈的性能比较

密封圈材料	近似温度极限/℃	适用性	物理性能	可否选择
天然橡胶	70	耐老化差、耐稳较差、价格低廉	弹性好	否
丁苯橡胶	75	耐磨、耐老化较好、耐温较差	加工性差	否
丁腈橡胶	150	以耐油著称,耐热比以上两个好、应用广泛	耐老化不理想	否
氟橡胶	260	耐磨性能最优异	耐磨性能不高	否
全氟橡胶	315	最佳的耐热材料	抗撕裂力强	可

从表 2 可以看出全氟橡胶耐温可以到达要求,全氟橡胶具有工作温度范围大、耐腐蚀、弹性好、抗撕裂力强、结构性能具有可设计性等特点,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的泄露,提高承压探管密封的安全性能。因此,设计在承压的密封双凹槽面上加设两道全氟橡胶 O 形密封圈,可以显著提高密封接触面的密封效果<sup>[8]</sup>。

(2) 2 种材料的膨胀实现自密封,承压外管的密封部件由承压管体与密封堵头组成,二者通过一定的预紧力扭紧实现密封。由于环境温度高达 270 ℃,可以利用不同材料之间的热膨胀差异实现自密封的效果。黄铜与 17-4PH 沉淀型硬化型不锈钢的线膨胀系统如表 3 所示。

表 3 2 种材料的线膨胀系数比较

材 料	线膨胀系数(20~100 ℃)
黄铜	$17.8 \times 10^{-6}$
17-4PH 沉淀型硬化型不锈钢	$11.0 \times 10^{-6}$

17-4PH 沉淀型硬化型不锈钢作为承压管体的材料,选用黄铜作为密封堵头的材料,承压管体的线膨胀系数略小于黄铜的热膨胀系数,在相同温度变化下,密封堵头的热膨胀量会略大于承压管体的热膨胀量,会缩小二者之间的间隙,从而实现材料膨胀自密封功能<sup>[9]</sup>。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:

$$\begin{cases} l = l_0(1 + \alpha \Delta t) \\ \Delta l = l_0 \Delta t (\alpha_1 - \alpha_2) \end{cases} \quad (3)$$

当仪器下放到温度为 270 ℃ 的工作区域时,与地表温度温差  $\Delta t$  为 245 ℃ (假设地表温度为 25 ℃),本设计中承压外管长度  $l_0$  为 2680 mm,通过上式计算得到  $\Delta l = 2.54$  mm,外管半径变化量  $\Delta r =$

$\Delta l/2\pi=0.404\text{ mm}$ 。

### 3 室内测试与现场应用

#### 3.1 室内测试

##### 3.1.1 高温测试

先将恒温箱加热至 270 °C,然后将编好号的 6 只保温瓶放入恒温箱中,将温度计放置在保温瓶内,每小时记录一次保温瓶内的温度(见表 4)。

表 4 金属保温瓶温度试验比较

序号	金属保温瓶	保温瓶内温度/°C					温升
		初始温度	1 h	2 h	3 h	4 h	
1	JP73/45-2378(D)-1	31.8	33.8	52.6	84.4	90.3	58.5
2	JP73/45-2378(D)-2	31.7	32.4	39.7	59.1	66.3	33.9
3	JP73/45-2378(D)-3	31.8	34.1	51.5	65.1	87.2	55.4
4	JP73/45-2378(D)-4	32.6	33.8	41.1	52.9	67.2	33.4
5	JP73/45-2378(D)-5	27.4	37.2	51.3	69.3	89.3	61.9
6	JP73/45-2378(D)-6	27.5	30.7	38.6	52.0	69.4	41.9

从表 4 可以看出,设计的保温瓶满足瓶内温升 <80 °C 的要求,满足高温要求。

##### 3.1.2 高压测试

由于测试设备的限制,耐高温高压测试容器的温度只能升温至 175 °C,且高温高压实现风险较高,上面已验证高温性能,下面主要分析耐压性能。将 6 只耐高温高压复合外管放置在超高压测试容器内,1 h 后逐渐加压至 140 MPa,稳压 2 h,取出复合承压管,试验过程如图 3 所示。

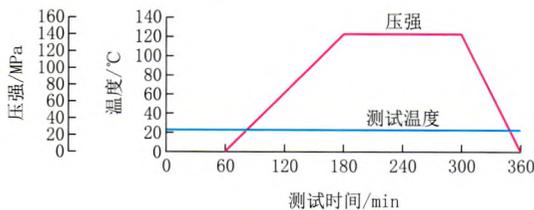


图 3 高压测试过程

取出复合承压外管,6 只均无液体渗漏,说明复合承压管可以满足 140 MPa 的高压要求。

#### 3.2 现场应用

耐高温高压复合保温外管多次应用于不同地区钻井现场测量工作,且采用不同工艺测量,都能正常工作。主要应用在以下现场。

(1)2016 年 6 月应用于北京通州西集 1 井,井

口出水温度 92 °C,采用测井绞车方式测量,仪器入井深度 2400 m,仪器测量数据正常。

(2)2017 年 7 月应用于青海共和 GR1 井,采用钻杆上提下放方式测量,测量至井深 3400 m,承压达到 43 MPa,井底温度 207 °C,耐高温耐压正常。

(3)2017 年 10 月应用于大庆“松科二井”,采用钢丝绳绞车方式测量,测量至井深 5800 m,承压达到 85 MPa,井底温度 177.5 °C,耐高温耐压正常。

另外,还包括 2017 年 11 月应用于北京延庆世园会探采 1 号井、2018 年 1 月应用于云南施甸县契丹文化旅游城地热井,均取得了良好的应用效果。经过多次现场应用与反复改进,复合保温外管也逐步完善,满足现场不同工艺的测试要求。

#### 4 结语

通过 270 °C 高温测试、140 MPa 高压测试及多次现场应用试验,证明耐高温高压复合保温外管满足超高温高压工作要求,稳定可靠,现场适用性强,可以广泛应用于高温高压地热能、科学钻探、深部矿产资源勘探以及深部油气资源勘探工程的需求,支持国家重要能源资源勘探工作。

#### 参考文献:

- [1] 王达,张伟,张晓西,等.中国大陆科学钻探工程科钻—井钻探工程技术[M].北京:科学出版社,2007.
- [2] 国家发展和改革委员会.可再生能源发展“十二五”规划[J].太阳能,2012,(16):6-19.
- [3] 陈梓慧,郑克桢,姜建军.试论我国干热岩地热资源开发战略[J].水文地质工程地质,2015,(3):161-166.
- [4] 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.
- [5] 周策,陈文俊,刘一民,等.小直径测斜仪的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(12):29-31.
- [6] 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.
- [7] 贺军.一种钻孔方位倾角组合测量仪的制作[J].安徽科技,2015,(2):49-50.
- [8] 冯志峰,张宜,季伟峰,等.超高温钻孔轨迹测量装置的机械设计及优化分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(S1):280-285.
- [9] 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.