

真空绝热保温瓶温升规律试验研究

李 忠, 赵燕来

(中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要:超高温钻孔轨迹测量仪是专为高温环境下的钻孔轨迹测量而开发的一种新型存储式测斜系统,以真空绝热保温瓶作为阻隔高温环境的主要手段,由于真空绝热保温瓶具有较大的长径比,其内部有效利用长度达到 2.0 m 左右,为了解在外界环境温度一定时,其内部沿轴向方向温升值的差异规律,为探管结构的合理布设提供依据,特别开展了本次试验研究。通过 2 只保温瓶的室内试验,获得了不同环境温度下的保温瓶内部温升值,通过对实测数据的分析,保温瓶内部温升规律主要有 3 个方面:一是温升值随时间基本为线性关系,温升速率随环境温度增加而加快;二是温升值与环境温度成 3 次曲线关系;三是保温瓶内部温升值由两端到中间逐步减小,中间部位温升值明显低于其两端。利用试验结果对探管结构进行了合理化的布设,采取了针对性的应对措施,确保了仪器工作温度指标达到项目考核要求,该试验结果也可为其他类似高温仪器的结构布设提供参考。

关键词:真空绝热;保温瓶;温升值;高温钻井;高温测井

中图分类号:P634.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)05-0046-07

Experimental study on temperature rise of the vacuum flask

LI Zhong, ZHAO Yanlai

(Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: The ultra-high temperature drilling trajectory measurement instrument is a new type of storage inclinometer system specially developed for drilling trajectory measurement in high temperature environment, with the vacuum flask as the main means of insulation from high temperature environment, since the vacuum flask has a large length/diameter ratio with the internal effective use length up to 2.0m. In order to understand the law of temperature rise in the axial direction of the vacuum flask when the external environment temperature is fixed, and provide a basis for the reasonable arrangement of the probe tube structure, this experimental study has been conducted. Through the laboratory test of two vacuum flasks, the internal temperature rise value of the vacuum flasks in different ambient temperatures was obtained. Through the analysis of the measured data, the internal temperature rise law of the vacuum flasks was found to include three main aspects; first, the temperature rise value is basically linear with time, and the temperature rise rate increases with the ambient temperature; second, the temperature rise value is a function of the ambient temperature in a cubic curve; third, the internal temperature rise value of the vacuum flask gradually decreases from both ends toward the middle, and the temperature rise value of the middle part is significantly lower than that of the two ends. Based on the test results, the layout of the probe tube structure has been rationalized with specific measures taken to ensure that the working temperature index of the instrument meets the specified requirements. The test results can also provide a reference for the structural layout of other similar high-temperature instruments.

Key words: vacuum insulation; vacuum flask; temperature rise value; high temperature drilling; high temperature logging

0 引言

高温地热能开发、干热岩开发工程、深海油气钻井、深部矿产资源勘探、大陆科学钻探施工等往往都

面临高温的问题,井底温度可能达到 200 °C 以上^[1-2],而常规的下井仪器其电子元器件耐受温度指标大体分为 125、150、175 °C 等 3 个档次^[3]。为

收稿日期:2019-04-28; **修回日期:**2020-04-12 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2020.05.008

基金项目:科技部国家重大科学仪器设备开发专项项目“超高温钻孔轨迹测量仪开发和应用”(编号:2013YQ050791)

作者简介:李忠,男,汉族,1972 年生,教授级高级工程师,探矿工程专业,硕士,主要从事钻探器具及地质灾害监测仪器的研究和开发工作,四川省成都市郫都区红光镇港华路 139 号,379292752@qq.com。

引用格式:李忠,赵燕来.真空绝热保温瓶温升规律试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(5):46-52.

LI Zhong, ZHAO Yanlai. Experimental study on temperature rise of the vacuum flask[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(5):46-52.

了解决高温环境下的测井仪器工作难题,采用真空绝热保温瓶(以下简称保温瓶)是最有效的手段。通过在测井仪器电子器件外部套上保温瓶来隔绝外界环境的高温,一定时间内将管内温度保持在电子器件工作的最高工作温度范围内,确保测井仪器能正常完成测井作业^[4-8]。

由我所承担的国家重大科学仪器设备开发专项项目“超高温钻孔轨迹测量仪开发和应用”(项目编号:2013YQ050791),为了实现超高温钻孔轨迹测量仪能在环境温度 270 °C 时,正常工作 4 h 的技术指标^[9],也是采用保温瓶来隔绝外部环境的高温,以满足仪器的正常工作时长。

保温瓶并不能完全阻止热的传递,其主要作用是减缓外部环境的热向保温瓶内传递,为测井仪器赢得必要的工作时间,保证瓶内的电子仪器在一定时间内工作在一定的温度之下^[10]。保温性能是其最重要的技术指标,其衡量是通过在一定环境温度下,工作一定时间,瓶内中心点温升数值的大小来衡量的,温升数值越小,保温瓶的保温性能越好,为测井仪器赢得的下井工作时间也会越长,也会让测井

仪器能在更高的温度环境下完成测井作业。

由于受到钻井直径的影响,超高温钻孔轨迹测量仪被设计成一根细长的杆,其直径只有 43 mm,但长度超过了 2.0 m,受此影响,配套的保温瓶也是一根细长的管,其内径 45 mm,总长达到了 2.40 m,其长径比超过了 50。对于如此细长的管,受保温瓶结构和热能传递方式(热传导、热对流、热辐射)^[11]的影响,在其外界工作温度一定时,保温瓶内部的温度在沿长度方向(轴向)上会存在较大的差异,为了摸清该差异情况,为超高温钻孔轨迹测量仪的结构布局优化设计提供依据,特开展了本次保温瓶内部温升分布规律的试验研究。

1 保温瓶结构

保温瓶的结构如图 1 所示,主要由压盖、堵头、隔热管、隔热棉、吸热体、保温瓶体以及尾套等构成^[12-14]。一端开口一端封闭。保温瓶体内外壳之间被抽成了真空以达到隔热的目的,吸热体与保温瓶体封闭端之间是安装超高温钻孔轨迹测量仪的空间,其有效长度为 2.0 m 左右。

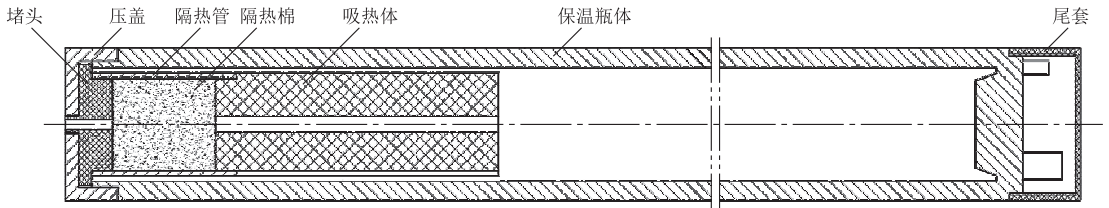


图 1 保温瓶示意图

Fig.1 Structure of the vacuum flask

2 试验方案

2.1 试验设备

试验设备主要包括 300 °C 高温试验箱、多路温度测试仪和铂电阻温度传感器(如图 2 所示)。高温试验箱用于模拟井下环境温度,多路温度测试仪和铂电

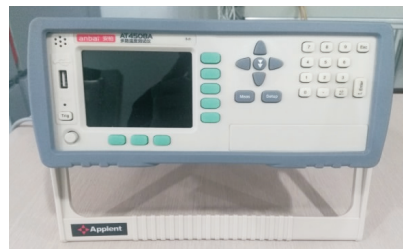
阻温度传感器用于测量和记录保温瓶内部温度值。

2.2 试验方法

在保温瓶内安装超高温钻孔轨迹测量仪的部分,沿其轴向均匀布设 6 只铂电阻温度传感器(见图 3),其编号分别为 1、2、3、4、5、6 号,温度传感器间隔距离为 0.4 m,将温度传感器引线延长引出到保温



(a) 高温试验箱



(b) 多路温度测试仪



(c) 铂电阻温度传感器

图 2 试验设备

Fig.2 Test equipment

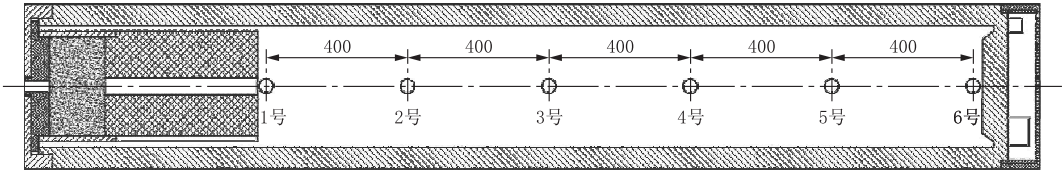


图3 温度传感器布设示意图

Fig.3 Layout of the temperature sensor

瓶和高温试验箱外,接入多路温度测试仪,然后将高温试验箱加热到设定温度,将保温瓶放入高温试验箱内,利用多路温度测试仪自动记录和保存6只温度传感器的数值,维持高温试验箱恒温工作4 h,通过与初始温度值(保温瓶放入高温试验箱时的温度值)的比较即可得到各温度传感器不同恒温时间下的温升值。

2.3 试验设计

试验保温瓶数量:2只;试验保温瓶编号:15074、15075;模拟的环境温度:150、180、210、240、270℃;恒温时间:4 h;数据采集频率:1组/5 s。

3 试验数据与分析

由于记录保存的数据较多,本次分析研究的温升值按照每0.5 h的数据进行整理,2只保温瓶的温升试验数据如表1所示。

4 数据分析

根据上述数据可分别做出相应的温升曲线,通过这些曲线,可以看出保温瓶内部温升的一些特点与规律,主要包括以下3个方面。

4.1 温升与时间的关系

2只保温瓶的温升-时间曲线如图4、图5所示,可以看出保温瓶内部温升数值与恒温工作时间总体基本是呈线性关系的,只是在恒温时间的前面1~2 h,温升值与恒温时间呈现一定的曲线关系,在后段的2~3 h内,温升值与时间是呈线性关系。在不同的环境温度下,其线性斜率不一样,即温升速率不一样,环境温度越高,其温升的速率也越快。

4.2 温升与环境温度的关系

保温瓶内各温度传感器的4 h温升值与外界环境温度的关系如图6、图7所示,也是呈现出一定的曲线关系,利用3次多项式可对曲线进行拟合。

其中,15074号保温瓶各传感器恒温4 h的温升值与环境温度具有如下关系式:

$$1 \text{ 号传感器: } y = -2 \times 10^{-5} x^3 + 0.0133x^2 - 2.7128x + 194.19$$

$$2 \text{ 号传感器: } y = 9 \times 10^{-7} x^3 + 0.0009x^2 - 0.2217x + 26.843$$

$$3 \text{ 号传感器: } y = -3 \times 10^{-7} x^3 + 0.0012x^2 - 0.2956x + 26.346$$

$$4 \text{ 号传感器: } y = -9 \times 10^{-7} x^3 + 0.0013x^2 - 0.305x + 24.726$$

$$5 \text{ 号传感器: } y = 6 \times 10^{-6} x^3 - 0.0028x^2 + 0.5533x - 32.763$$

$$6 \text{ 号传感器: } y = 6 \times 10^{-6} x^3 - 0.003x^2 + 0.7889x - 49.466$$

15075号保温瓶各传感器恒温4 h的温升值与环境温度的关系式如下:

$$1 \text{ 号传感器: } y = -2 \times 10^{-5} x^3 + 0.0133x^2 - 2.7128x + 194.19$$

$$2 \text{ 号传感器: } y = 9 \times 10^{-7} x^3 + 0.0009x^2 - 0.2217x + 26.843$$

$$3 \text{ 号传感器: } y = -3 \times 10^{-7} x^3 + 0.0012x^2 - 0.2956x + 26.346$$

$$4 \text{ 号传感器: } y = -9 \times 10^{-7} x^3 + 0.0013x^2 - 0.305x + 24.726$$

$$5 \text{ 号传感器: } y = 6 \times 10^{-6} x^3 - 0.0028x^2 + 0.5533x - 32.763$$

$$6 \text{ 号传感器: } y = 6 \times 10^{-6} x^3 - 0.003x^2 + 0.7889x - 49.466$$

4.3 温升与内部长度间距的关系

图8、图9是两只保温瓶各传感器在不同环境温度下恒温4 h的温升值曲线,从图中可以看出,保温瓶内部沿轴向方向不同位置的温升值并非一样的,靠近保温瓶两端的温升值是最大的,而保温瓶中间部分的温升值是最小的,说明保温瓶的漏热主要来源于保温瓶两个端部,其主要原因在于两个端部的传热是属于固体导热(包括内管壁、隔热管、吸热体以及尾套等的固体导热),而中间部分的传热主要

表 1 保温瓶内部温升试验数据
Table 1 Internal temperature rise test data of vacuum flasks

环境温度/ ℃	保温瓶 编号	传感器 编号	温升值/℃							
			0.5 h	1.0 h	1.5 h	2.0 h	2.5 h	3.0 h	3.5 h	4.0 h
150	15074	1	1.3	4.2	8.1	12.1	16.0	19.8	23.2	26.2
		2	0.1	0.8	2.5	5.0	7.9	10.9	13.9	16.8
		3	0.0	0.1	0.5	1.4	2.7	4.3	6.1	8.0
		4	0.0	0.0	0.3	0.8	1.7	2.7	4.0	5.4
		5	0.0	0.1	0.4	1.2	2.2	3.6	5.3	7.1
		6	0.8	3.0	5.8	8.8	11.9	14.8	17.7	20.5
	15075	1	1.5	4.9	9.3	13.7	18.0	22.0	25.5	28.5
		2	0.1	1.2	3.6	6.8	10.4	14.0	17.6	21.0
		3	0.0	0.8	2.6	5.1	8.0	11.0	14.2	17.3
		4	0.1	1.2	3.4	6.3	9.5	12.8	16.2	19.5
		5	0.2	1.9	5.1	8.9	13.0	17.0	20.9	24.7
		6	1.2	5.0	9.9	14.9	19.7	24.3	28.6	32.6
180	15074	1	1.4	4.7	9.1	13.8	18.5	22.8	26.8	31.6
		2	0.1	0.9	3.2	6.4	10.0	13.8	17.6	21.3
		3	0.0	0.1	0.7	1.8	3.5	5.5	7.9	10.4
		4	0.0	0.0	0.3	1.0	2.1	3.5	5.2	7.0
		5	0.0	0.1	0.6	1.6	3.1	5.0	7.3	9.7
		6	1.1	4.2	8.0	12.1	16.2	20.3	24.1	27.8
	15075	1	1.6	5.3	10.1	15.2	20.2	24.7	29.1	35.6
		2	0.1	1.5	4.4	8.3	12.7	17.1	21.4	25.7
		3	0.1	1.0	3.3	6.5	10.1	13.9	17.8	21.7
		4	0.1	1.4	4.2	7.9	12.0	16.2	20.4	24.6
		5	0.2	2.4	6.5	11.4	16.6	21.8	26.9	31.8
		6	1.4	6.4	12.8	19.3	25.6	31.5	37.1	42.3
210	15074	1	1.9	6.2	11.9	17.8	23.6	29.1	36.5	45.1
		2	0.1	1.3	4.3	8.5	13.3	18.2	23.1	28.2
		3	0.0	0.2	1.0	2.6	4.9	7.7	10.9	14.3
		4	0.0	0.1	0.5	1.5	3.0	5.0	7.4	10.0
		5	0.0	0.2	0.9	2.3	4.4	7.2	10.4	13.9
		6	1.6	5.9	11.2	16.7	22.2	27.6	32.7	37.5
	15075	1	2.3	7.1	13.1	19.3	25.3	31.6	40.9	50.3
		2	0.2	2.0	5.9	10.9	16.4	22.0	27.6	33.5
		3	0.1	1.5	4.6	8.7	13.4	18.3	23.3	28.4
		4	0.2	2.0	5.7	10.5	15.8	21.2	26.6	32.0
		5	0.3	3.3	8.5	14.8	21.5	28.1	34.6	40.8
		6	2.3	8.9	16.9	25.1	33.0	40.5	47.5	54.0
240	15074	1	2.2	7.2	13.9	21.2	28.4	38.1	49.0	59.6
		2	0.1	1.8	5.9	11.6	17.9	24.4	31.0	37.9
		3	0.0	0.3	1.5	3.9	7.3	11.4	15.9	20.5
		4	0.0	0.1	0.8	2.2	4.5	7.4	10.7	14.4
		5	0.0	0.2	1.0	2.8	5.6	9.2	13.4	17.9
		6	2.0	7.1	13.3	19.9	26.6	33.2	39.5	45.5
	15075	1	2.4	7.8	14.8	22.4	30.1	41.5	53.1	64.1
		2	0.2	2.4	7.2	13.4	20.3	27.4	34.8	42.5
		3	0.1	1.7	5.5	10.7	16.7	22.9	29.3	35.7
		4	0.2	2.4	7.1	13.2	19.9	26.8	33.6	40.4
		5	0.4	4.0	10.7	18.6	27.0	35.3	43.5	51.3
		6	2.5	10.4	20.5	30.7	40.6	49.9	58.6	66.7
270	15074	1	2.7	9.1	17.7	26.9	37.4	51.0	64.1	76.3
		2	0.2	2.7	8.7	16.4	24.5	32.8	41.5	50.3
		3	0.0	0.4	2.2	5.8	10.6	16.1	22.0	28.1
		4	0.0	0.2	1.1	3.2	6.4	10.4	15.0	19.9
		5	0.1	0.3	1.5	4.2	8.4	13.5	19.2	25.3
		6	2.3	8.6	16.5	25.2	33.9	42.3	50.3	57.8
	15075	1	2.8	8.9	16.7	25.9	37.4	51.7	65.0	77.5
		2	0.2	2.8	8.6	16.2	24.5	33.3	42.5	51.9
		3	0.1	2.2	7.0	13.6	21.0	28.8	36.6	44.5
		4	0.2	3.1	9.0	16.7	25.0	33.5	42.0	50.3
		5	0.4	4.7	12.7	22.3	32.5	42.7	52.5	62.0
		6	2.9	12.0	23.8	36.0	47.7	58.8	69.2	78.9

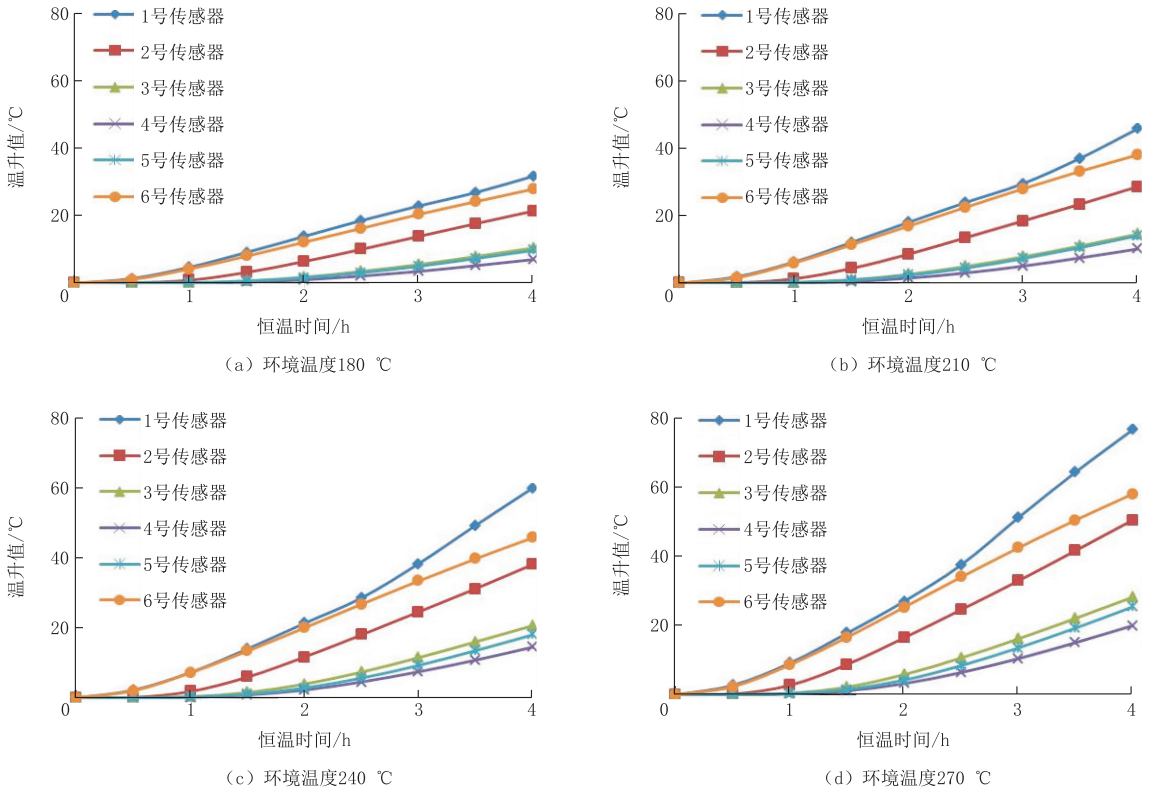


图4 15074号保温瓶传感器温升—时间曲线

Fig.4 Temperature rise vs time curve of 15074 # vacuum flask sensor

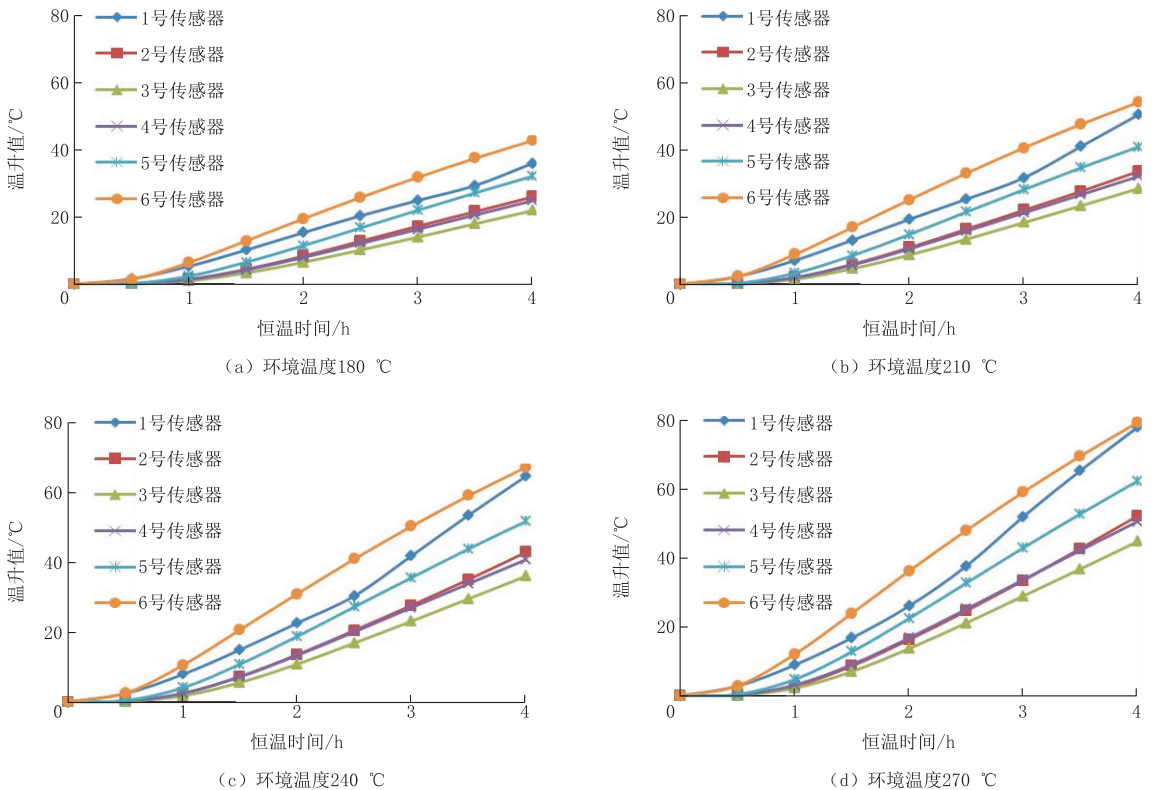


图5 15075号保温瓶传感器温升—时间曲线

Fig.5 Temperature rise vs time curve of 15075 # vacuum flask sensor

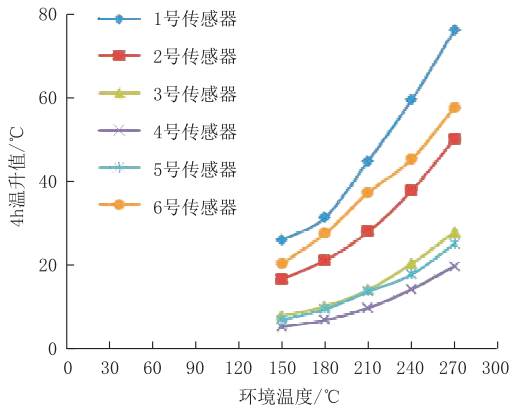


图 6 15074 号保温瓶环境温度——4 h 温升曲线

Fig.6 4h temperature rise curve of 15074# vacuum flask at ambient temperature

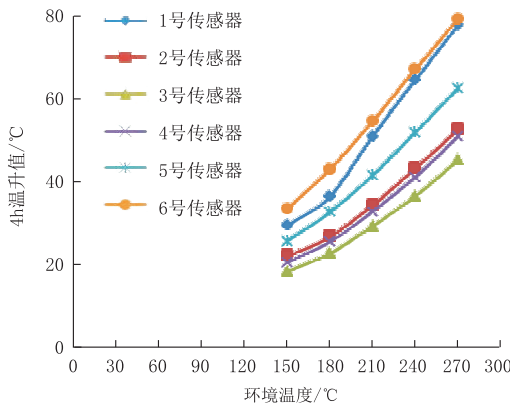


图 7 15075 号保温瓶环境温度——4 h 温升曲线

Fig.7 4h temperature rise curve of 15075# vacuum flask at ambient temperature

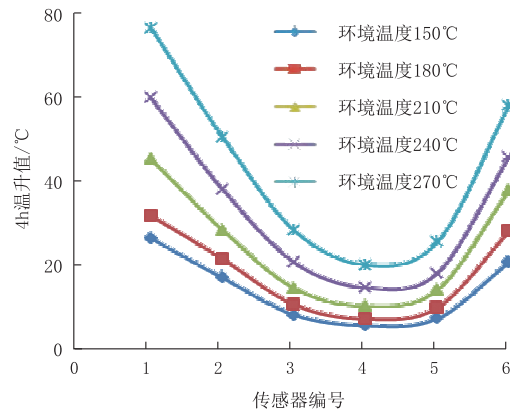


图 8 15074 号保温管各传感器 4 h 温升曲线

Fig.8 4h temperature rise curve of each sensor of 15074# vacuum flask

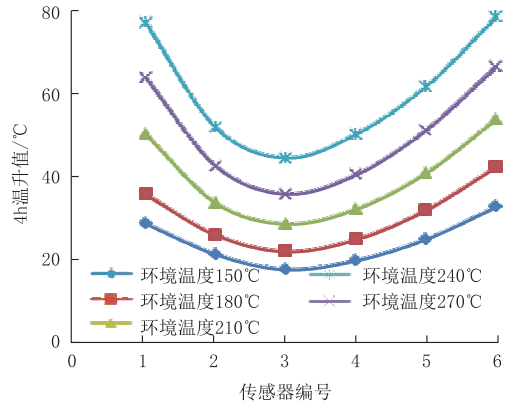


图 9 15075 号保温管各传感器 4 h 温升曲线

Fig.9 4h temperature rise curve of each sensor of 15075# vacuum flask

是由保温瓶体内外壳之间的辐射漏热、残余气体的导热以及真空层间的固体传热等构成^[15],保温瓶两端的固体传热要远远大于沿内外壳之间的辐射传热。同时也可以看出,两只保温瓶两端的传热规律也有一定差异,15074 号保温瓶的开口端的温升要高于封闭端的温升,而 15075 号保温瓶封闭端的温升要高于封闭端的温升,分析存在这个现象的主要原因可能是两只保温瓶制造工艺以及吸热体存在一定的差异性造成的。

5 试验结果的应用

摸清了保温瓶内部沿轴向方向的温升规律,为超高温钻孔轨迹测量仪探管的结构布局设计提供了依据,根据温升试验结果,设计超高温钻孔轨迹测量仪探管结构布局如图 10 所示,其中高温电池位于保温瓶开口端,减震头位于保温瓶封闭端。

布设理由如下:

(1)高温电池处于保温瓶开口端,也就是保温瓶温升较大处,主要是因为所选用的高温电池可以耐受 150 °C 的高温,尽管该处是保温瓶内温升最高的部分,但电池依然可以正常工作。

(2)为了应对保温瓶封闭端的较高温升,在探管下端增设了吸热体 3,通过该吸热体来吸收由封闭端传导的热,减少外部环境导致的温升,同时也可以降低加速度计、光纤陀螺等传感器部分自身发热导

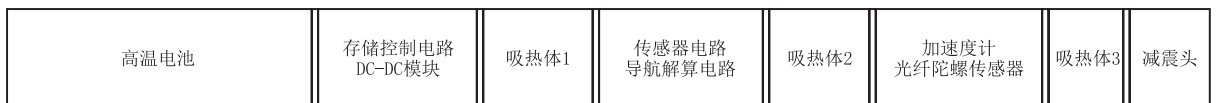


图 10 超高温钻孔轨迹测量仪结构布局示意图

Fig.10 Structural layout of the ultra-high temperature drilling trajectory measurement instrument

致的温升,确保其正常工作。

(3)由于仪器功耗较大,DC-DC模块、传感器电路等的功耗和发热也较大,因此将这些部件布设于保温瓶中部温升较小的地方,尽可能减少外界环境温度的影响,同时为了降低其自身发热导致的温度上升影响,特别在各部件之间也增设了长度不等的吸热体1和吸热体2。

通过上述结构布局设计的超高温钻孔轨迹测量仪样机,通过室内的测试,实现了环境温度270℃时,正常工作4h的技术指标,达到了项目任务书要求,本项目已于2018年5月通过自然资源部组织的技术初步验收,于2019年12月通过了科技部组织的综合验收。

6 结论

通过模拟多个环境温度开展的保温瓶内部轴向温升规律的试验研究,得出如下一些结论:

(1)保温瓶沿轴向方向内部温升值并非一样大小,而是在两端处最大,中间最小。

(2)保温瓶的漏热主要来源于保温瓶两端的固体传热,两端的固体传热远远大于保温瓶内外壳之间辐射传热、残余气体的导热以及真空层间的固体传热。

(3)保温瓶内部温升与恒温时间基本成直线关系,与外部环境温度基本成3次多项式的关系。

上述温升试验规律,指导了超高温钻孔轨迹测量仪的结构布局,满足了超高温钻孔轨迹测量仪的项目设计要求,该结果也可以为其他类似高温仪器的结构布设提供参考。

参考文献(References):

- [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.
ZHANG Wei. Extraction of high temperature rock mass heat energy and related drilling technologies[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(10):219-224.
- [2] 曹继飞,赵洪山,余广兴,等.土耳其高温地热钻井关键技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(9):34-36,41.
CAO Jifei, ZHAO Hongshan, YU Guangxing, et al. Key technology for high temperature geothermal drilling in Turkey [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(9):34-36,41.
- [3] 楚泽涵,袁祖贵,李云平.关于提高地球物理测井仪器温度性能指标问题[J].测井技术,2004,28(3):181-186.
CHU Zehan, YUAN Zugui, LI Yunping. On improvement of temperature index of petrophysical logging tools[J]. Well Logging Technology, 2004,28(3):181-186.
- [4] 王亚芳,沙荣钧.石油测井仪用小保温瓶的研制[J].低温与

- 特气,2002,20(6):26-28,37.
WANG Yafang, SHA Rongjun. Research on mini vacuum flask for an apparatus used in petrol well[J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2002,20(6):26-28,37.
- [5] 宣伟,黄倩,韩锐.石油测井用承压金属保温瓶的焊接工艺[J].低温与超导,2014,42(2):59-61.
XUAN Wei, HUANG Qian, HAN Rui. Welding process of the load-bearing metal vacuum flask used in petroleum logging [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2014,42(2):59-61.
- [6] 刘耀伟,侯振学,廖胜军,等.高温电成像仪器的研制与应用[J].海洋石油,2018,38(3):39-45.
LIU Yaowei, HOU Zhenxue, LIAO Shengjun, et al. Development and application of high temperature electrical imaging tool[J]. Offshore Oil, 2018,38(3):39-45.
- [7] 严语鸣,李会银,徐德龙,等.小直径自然伽马能谱测井仪设计[J].测井技术,2018,42(1):113-116.
YAN Yuming, LI Huiyin, XU Delong, et al. Design of small diameter natural gamma-ray spectrometer logging tool [J]. Well Logging Technology, 2018,42(1):113-116.
- [8] 游畅.小型化3516测井通讯系统的设计与实现[D].成都:电子科技大学,2014.
YOU Chang. Design and implementation of a miniaturization 3516 communication system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [9] 周策,刘一民,罗光强,等.存储式光纤陀螺测斜探管研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):147-159.
ZHOU Ce, LIU Yimin, LUO Guangqiang, et al. Development of storage type fiber optic gyro inclinometer[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(10):147-159.
- [10] 冯永伟.提高同轴线相位法找水仪温度性能的技术研究[D].大庆:大庆石油学院,2010.
FENG Yongwei. An technical research on the improvement of temperature performance of the coaxial line water detector [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2010.
- [11] 杨士铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,2006.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [12] 罗光强,周策,刘一民,等.耐高温高压复合保温管研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(8):15-18.
LUO Guangqiang, ZHOU Ce, LIU Yimin, et al. Research on high temperature and high pressure composite insulation tube[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(8):15-18.
- [13] 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 borehole inclinometer for ultra-high temperature hot dry rock drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(4):44-48.
- [14] 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. Development of the automatic north-finding gyroscope inclinometer for super-deep geological drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(3):36-40.
- [15] 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,2005,33(2):73-76,68.
HAN Rui, ZHANG Xuehua, ZHANG Junfeng. A new type of well logging vacuum flask[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2005,33(2):73-76,68.