

# 抗高温保温筒相变材料仿真特性研究

刘 聃<sup>1,2,3,4</sup>, 陈剑焱<sup>1,2,3,4</sup>, 侯 岳<sup>1,2,3,4</sup>, 何 楠<sup>1,2,3,4</sup>, 刘静涛<sup>5</sup>, 周绍武<sup>1,2,3,4</sup>

- (1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000;  
2. 自然资源部定向钻井工程技术创新中心, 河北 廊坊 065000;  
3. 中国地质调查局定向钻井技术创新中心, 河北 廊坊 065000;  
4. 廊坊聚力勘探科技有限公司, 河北 廊坊 065000; 5. 辽宁省地矿集团钻探有限责任公司, 辽宁 辽阳 111000)

**摘要:** 随着以“慧磁”钻井中靶导向系统为代表的主动磁测技术的不断提升和应用范围的不断扩展, 未来将更多应用在地热开发井、深部矿产资源勘探井等高温井中, 高温会成为限制仪器在上述领域应用的“瓶颈”问题。为进一步提升“慧磁”系统的耐温性能, 提出采用被动热管理方式, 通过使用有限元方法对保温筒相变储热特性进行仿真计算, 探究了吸热体最佳耦合长度并横向对比控温能力最佳的相变材料, 分析了保温筒内部轴向温度和吸热体相态随时间变化情况。结果表明, 上吸热体长度400 mm和下吸热体长度250 mm为最佳耦合长度, 保温筒在150℃下工作6 h后, 上吸热体相变潜热利用率96.7%, 下吸热体相变潜热利用率70.5%, 电路板最低温度63.48℃, 低熔石蜡控温效果最佳。

**关键词:** 高温井; “慧磁”钻井中靶导向系统; 保温筒; 相变材料; 热管理; 传热仿真

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)06-0048-11

## Study on simulation characteristics of phase change materials for high temperature resistant vacuum flask

LIU Dan<sup>1,2,3,4</sup>, CHEN Jianyao<sup>1,2,3,4</sup>, HOU Yue<sup>1,2,3,4</sup>, HE Nan<sup>1,2,3,4</sup>, LIU Jingtao<sup>5</sup>, ZHOU Shaowu<sup>1,2,3,4</sup>

- (1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;  
2. Technology Innovation Center for Directional Drilling Engineering, Ministry of Natural Resources, Langfang Hebei 065000, China;  
3. Technology Innovation Center for Directional Drilling, China Geological Survey, Langfang Hebei 065000, China;  
4. Langfang Juli Exploration Technology Co., Ltd., Langfang Hebei 065000, China;  
5. Liaoning Province Geology and Minerals Group Drilling Co., Ltd., Liaoyang Liaoning 111000, China)

**Abstract:** With the continuous improvement and expansion of the application scope of active magnetic measurement technology represented by SmartMag Drilling Target-Hitting Guide System, it will be more applied in high-temperature underground environments such as geothermal well development and deep-sea mineral resource exploration in the future. High temperature often becomes a bottleneck problem that restricts the normal operation of instruments. In order to further improve the temperature resistance performance of the SmartMag system, this article adopts passive thermal management method and uses finite element method to simulate the phase change heat storage characteristics of the vacuum flask. It explores the optimal coupling length of the heat absorbing body and compares the phase change materials with the best temperature control ability horizontally. It analyzes the changes in axial

收稿日期: 2024-01-29; 修回日期: 2024-05-09 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.06.006

基金项目: 中国地质调查局勘探技术研究所科技项目“慧磁仪器抗高温保温筒技术研究”(编号: YB202204)

第一作者: 刘聃, 男, 汉族, 1991年生, 工程师, 地质资源与地质工程专业, 硕士, 从事定向钻探技术研究工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, 260659112@qq.com。

引用格式: 刘聃, 陈剑焱, 侯岳, 等. 抗高温保温筒相变材料仿真特性研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(6): 48-58.

LIU Dan, CHEN Jianyao, HOU Yue, et al. Study on simulation characteristics of phase change materials for high temperature resistant vacuum flask[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 48-58.

temperature and phase state of the heat absorbing body inside the vacuum flask over time. The results show that the optimal coupling lengths are 400mm for the upper absorber and 250mm for the lower absorber. After operating the insulation cylinder at 150°C for 6 hours, the utilization rate of phase change latent heat of the upper absorber is 96.7%, and the utilization rate of phase change latent heat of the lower absorber is 70.5%. The minimum temperature of the circuit board is 63.48°C, and the temperature control effect of low melting paraffin is the best.

**Key words:** high temperature well; SmartMag Drilling Target-Hitting Guide System; vacuum flask; phase change materials; thermal management; heat transfer simulation

## 0 引言

测井仪作为石油勘探和矿产资源开发中的关键设备,越来越多地应用于超深井油气资源开采、地热井、干热岩等高温井下环境中,在高温环境漏热和电子器件自身发热的影响下,测井仪内部电子器件随着时间而逐渐升温,一旦超过电子器件的安全工作温度,就会导致电子器件信噪比下降和寿命缩短,甚至损毁,因此高温常常成为限制井下仪器正常运行的“瓶颈”问题。目前国内外常用的电子器件散热技术主要分为主动热管理方式和被动热管理方式,相比较于需要额外功率输入和结构复杂的主动热管理方式,被动热管理方式结构简单、成本低、运行更加可靠。所以常采用被动热管理的方法对测井仪内部的电子器件进行保护,以免受恶劣高温环境的影响。“慧磁”钻井中靶导向测井仪作为主动磁测技术的优秀代表,当前广泛应用在可溶性矿产、煤层气等对接井组中,随着其技术的不断提升及应用范围的不断拓展,未来将有望应用在地热对接井中,高温环境对“慧磁”测井仪的耐温性能提出了更高的要求。

为进一步提升“慧磁”测井仪耐温性能,本文对“慧磁”抗高温保温筒采用被动热管理方式,使用有限元方法对保温筒相变储热特性进行研究,从温度场分布及相变材料储热情况进行仿真模拟分析,利用控制变量法探究吸热体最佳耦合长度,横向对比控温能力最好的相变材料,研制可靠有效的井下抗高温保温相变装置,以期满足初温 20 °C 的“慧磁”测井仪在 150 °C 高温环境下工作 6 h 后,内部磁通门传感器等电子器件不超 80 °C 安全工作温度。

## 1 相变材料热管理

### 1.1 测井仪热管理方法

测井仪抗高温热管理方法主要有主动冷却技术和被动冷却技术。其中主动冷却技术包括热电制冷<sup>[1-2]</sup>、液体冷却<sup>[3]</sup>、吸附冷却<sup>[4]</sup>和蒸汽压缩循环制

冷<sup>[5-6]</sup>等技术,主动冷却技术虽有着出色的冷却效果,但需依赖于额外的电力输入、冷却液及附加移动组件,增加系统复杂性的同时,大大降低了系统的可靠性。相比而言,被动冷却技术具有较好的可靠性、集成性和稳定性,广泛用于测井仪抗高温热管理中,被动冷却技术通常由热障涂层、真空保温层、隔热体、吸热体、电路板等部分组成,其中热障涂层和真空保温层用于隔绝瓶体环境漏热,可以大幅减缓外部环境的热量向测井仪内部传递<sup>[7-8]</sup>。隔热塞常位于保温筒端部,以隔绝端部漏热。吸热体位于隔热塞和金属骨架之间,以储存保温筒内环境漏热和电路板的自发热<sup>[9]</sup>。电路板则通过使用耐高温元器件、优化电路结构、低功耗设计等方式,提升电路板自身耐温性能<sup>[10]</sup>。一般采用几种组合的方式进行被动热管理。

### 1.2 相变材料类型

在被动热管理中,通过使用吸热体增加系统总热容是提升保温筒抗高温能力的有效方法,可以保证仪器吸收大量热量却不产生较大的温升。吸热体由封闭的金属外壳和相变材料组成,相变材料是增加系统总热容的可靠方案。

相变储热材料按照相变形式可分为4类,分别为固-固相变、固-液相变、固-气相变、液-气相变。因固-气相变、液-气相变在相变过程中产生大量气体,相变材料体积变化较大,存在泄漏、爆炸等风险,故在保温筒热管理中通常使用固-固相变、固-液相变的相变类型。按照化学成分可分为4类,分别为无机相变储热材料、有机相变储热材料、复合相变储热材料和金属相变储热材料<sup>[11-12]</sup>。无机相变储热材料主要有金属盐水合物、碱水合物、活性白土及矿棉等,如  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  等水合盐。有机相变储热材料主要有石蜡、酯酸类等。金属相变储热材料主要为金属及合金的相变储热材料,如伍德合金等。按照相变温度的不同又可分为低温相变材料(-50~90 °C)、中温相变材料(90~

400 °C)和高温相变材料(大于400 °C)。

### 1.3 相变材料优选

在相变材料选择方面,主要从相变材料的热力学参数、化学性能和经济性方面考虑。热力学参数重点考虑单位质量潜热高、高密度、高比热、高导热率等。化学性能上重点考虑相变稳定性、不易分界、寿命长、无腐蚀、无毒、无爆炸等。经济性重点考虑价格低廉、储量丰富等<sup>[13-14]</sup>。

在“慧磁”抗高温保温筒被动热管理的研究中,相变材料从相变形式上优选固-液相变。为保证内部磁通门等传感器工作温度 $\geq 80$  °C,相变温度选择40~80 °C之间的低温相变材料,避免出现电路板温度达到80 °C,吸热体内相变材料还未发生相变,而无法利用相变材料潜热储热。

### 1.4 相变传热机理

图1为典型的相变储热过程曲线,非相变材料始终依靠显热进行储热,温度随着储热时间持续升高,相变材料首先利用固相显热吸收环境漏热和电路板自身产热,随着环境的不断漏热和电路板不断生热,相变材料温度持续升高,A点时达到相变温度,相变材料开始发生固-液相变,此时利用相变潜热进行储热,相变材料温度几乎不变,当达到B点时相变材料完全相变,潜热利用率100%,液相的相变材料温度继续升高,利用液相显热吸热能力继续进行储热。

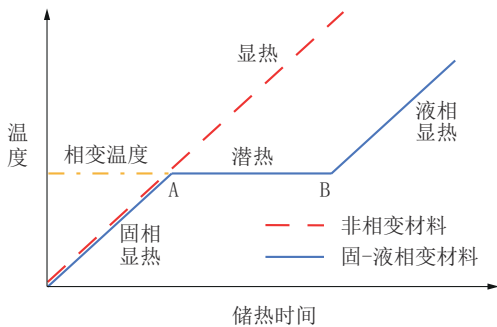


图1 相变储热经典曲线

Fig.1 Classic curve of phase change heat storage

在相变储热的过程中,相变材料导热系数和相变潜热是影响相变储热的两个关键因素,其中相变材料导热系数决定导热速率,即相变储热曲线中显热部分的升温速率,相变潜热决定了相变潜热能力,即相变储热曲线中潜热部分的储热时间。相变材料往往随着导热系数的增加,相变潜热会下降,两者的耦合关系决定了相变材料的储热性能。一

般随着相变材料导热系数的增大,热源温度变化会出现如图2所示4种情况<sup>[15]</sup>:

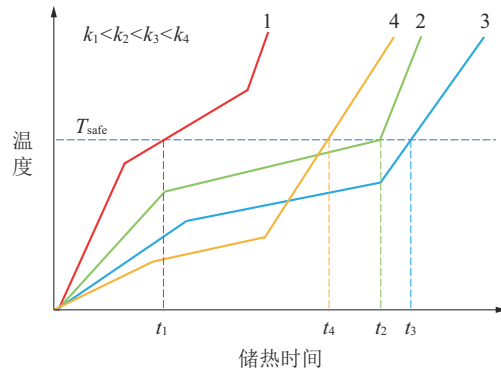


图2 电路板温升随相变材料导热系数的变化曲线  
Fig.2 Curve of circuit board temperature rise with thermal conductivity of phase change material

(1)相变材料导热系数较低,相变材料储热速率较慢,热源热量快速积累而温升速率较高,很快就达到电路板的安全温度,相变材料刚发生相变,潜热利用率较低,测井仪正常工作时间较短。

(2)相变材料导热系数增大,储热速率加大,热源温升速率减慢,当电路板达至安全温度时,相变材料刚刚完全相变,测井仪工作时间有效延长。

(3)相变材料导热系数继续增大,储热速率进一步增大,温升速率进一步减小,当电路板达至安全温度时,相变材料已完全相变,并继续以显热状态吸热一段时间,测井仪工作时间进一步延长。

(4)相变材料导热系数较大,当电路板达至安全温度时,相变材料早已完全相变,相变潜热较低,潜热储热时间较短,相变材料以显热储热为主,测井仪工作时间缩短。

综上对4种相变传热过程进行分析,第三种情况最为理想,在电路板达到安全温度之前,相变材料早已完全相变,并以液相显热继续吸收一部分热量,测井仪工作时间最长。故在后续相变材料的选取和上下吸热体尺寸仿真分析中,应尽量充分利用相变潜热,提升潜热利用率,以获得更长的仪器工作时间。

## 2 模拟仿真

### 2.1 数值模拟方法

使用有限元软件COMSOL Multiphysics 5.6采用瞬态传热模型和相变模型,在固体和流体传热物理场下,建立二维轴对称模型,对抗高温保温筒在

高温井下传热过程进行仿真分析。初始温度设定为 20 °C,保温筒外环境温度设定为 150 °C,模拟时间总长 6 h,时间步长 0.1 h。

在模拟之前,需要做一些假设以简化计算:(1)关于传热计算的参数不随时间变化;(2)保温筒内空气间隙较小,忽略热对流;(3)保温筒内真空层等效为低热导率的固体层;(4)温度分布轴对称;(5)相变过程采用等效热容法。

抗高温保温筒模型试作瞬态传热问题,依据以下导热微分方程进行研究<sup>[16]</sup>:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q \quad (1)$$

式中: $\rho$ ——密度,kg/cm<sup>3</sup>;  $c$ ——比热容,J/(kg·K);  $\lambda$ ——热导率,W/(m·K);  $q$ ——单位时间、单位体积的生成热,W/m<sup>3</sup>。

由于相变过程是非线性的,采用独立方程描述相变过程。在相变过程中,相变材料的密度会随着已融化相变材料的体积百分比而变化。故采用等效比热方程来解决这一问题<sup>[17-19]</sup>。

$$\rho_{PCM} = \theta \cdot \rho_{PCM,s} + (1 - \theta) \cdot \rho_{PCM,l} \quad (2)$$

$$c_{PCM} = \frac{1}{\rho_{PCM}} [\theta \cdot \rho_{PCM,s} \cdot c_{PCM,s} + (1 - \theta) \cdot \rho_{PCM,l} \cdot c_{PCM,l}] + L \frac{\partial \alpha_m}{\partial T} \quad (3)$$

$$\theta(T) = \begin{cases} 1 & T \leq T_m \\ \frac{V_{PCM,s}}{V_{PCM,s} + V_{PCM,l}} & T_m < T < T_m + \Delta T \\ 0 & T \geq T_m + \Delta T \end{cases} \quad (4)$$

$$\alpha_m = \frac{1(1 - \theta) \cdot \rho_{PCM,l} - \theta \cdot \rho_{PCM,s}}{2(1 - \theta) \cdot \rho_{PCM,l} + \theta \cdot \rho_{PCM,s}} \quad (5)$$

式中: $\rho_{PCM}$ 、 $\rho_{PCM,s}$ 、 $\rho_{PCM,l}$ ——分别表示相变材料的密度及相变材料在纯固体、纯液体状态下的密度,kg/cm<sup>3</sup>;  $c_{PCM}$ 、 $c_{PCM,s}$ 、 $c_{PCM,l}$ ——分别表示相变材料的比热容及相变材料在纯固体、纯液体状态下的比热容,J/(kg·K);  $T_m$ ——相变材料的熔点,°C;  $\Delta T$ ——相变转变温度间隔,°C;  $L$ ——相变材料潜热,kJ/kg;  $\theta$ ——相变过程中固相体积百分数;  $\alpha_m$ ——从固相到液相的相转变质量分数<sup>[20]</sup>。

### 2.2 几何模型

抗高温保温筒采用被动热管理的方式对内部电路进行保护。物理结构上由保温筒、内含相变材料的上下吸热体、隔热塞、金属骨架及电路板组成(如图3所示)。电路板置于金属骨架之上,从骨架往外依次是吸热体、隔热塞,以上所有部分置于保温筒内部。抗高温保温筒有效的被动热管理主要依赖3个方面,一是采用真空保温筒、隔热塞隔绝环境漏热,其中真空层看做导热系数较低的流体,等效导热系数0.002 W/(m·K),且不考虑热辐射的影响<sup>[21-22]</sup>。真空保温层真空度一般在 10<sup>-3</sup> Pa 以上<sup>[23]</sup>,端部采用焊接密封,具有良好的绝缘性,能够起到阻隔热传导和对流传热的作用。二是吸热体中的潜热相变材料吸收环境漏热和电路板的自身产热,通过金属骨架建立电路板与吸热体的导热通道。三是各部分的选材、尺寸和安装位置,均可对系统的保温效果产生一定的影响。

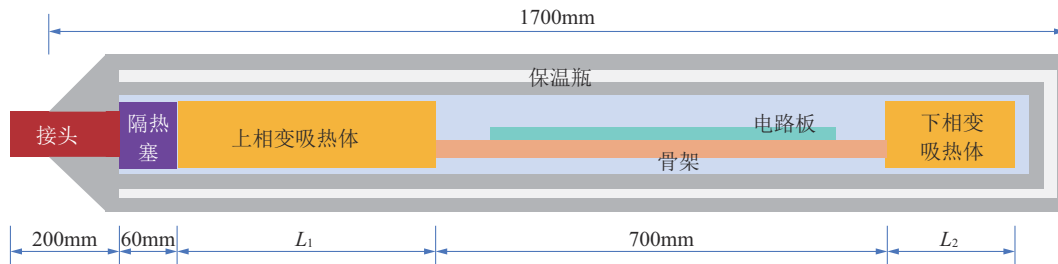


图3 抗高温保温筒结构示意图

Fig.3 Structure diagram of high temperature resistant vacuum flask

根据抗高温保温筒结构建立储热系统传热几何模型,并定义各部分热物性参数,鉴于“慧磁”探管对无磁环境要求较高,金属承压外壳选用钛合金材料,该材料磁导率较低、强度高,金属骨架选用铝合金,隔热体选用聚四氟乙烯。其余各部分选材及

热物性参数见表1。

### 3 结果及分析

实验及模拟结果方面,抗高温保温筒内部的数值模拟值与物理实验值的升温曲线基本一致,仿真



表1 仿真材料设置及其热物性

Table 1 Simulation material setup and thermal properties

组成部分	材料	导热系数/[W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	恒压比热容/[J·(kg·K) <sup>-1</sup> ]
保温筒外壳	钛	14.63	4510	520
保温层	真空	0.002	0.5	1200
相变吸热体	固态石蜡	0.15	920	1930
	液态石蜡	0.15	785	2380
骨架	铝合金	130	2800	960
隔热体	聚四氟乙烯	0.25	2200	1000
保温筒内部	空气	0.026	1.29	1005
电路板	覆铜板	16.5	2145	1136

过程从温度场分布及相变材料储热情况进行分析,利用控制变量法研究上、下吸热体耦合长度、相变材料种类对抗高温保温筒储热系统控温性能的影响,以获得上、下吸热体最佳耦合长度,横向对比控温能力最好的相变材料<sup>[24]</sup>,探究上、下吸热体相态和轴线温度分布随时间变化情况。

### 3.1 实验及模拟结果

为验证仿真模拟结果的准确程度,开展了一次室内实验,实验台架主要由数据采集仪、电热自动恒温干燥箱等组成,其中电热自动恒温干燥箱型号为CJ26026,可提供10~250℃的恒温环境,控温误差为±5℃,温度探头放置于瓶内空间的1/2处并悬空支起在瓶内轴线上。测试过程中,抗高温保温筒组装完成后,整体置于150℃的电热自动恒温干燥

箱内,每隔一定时间记录温度探头的温度。

从图4仿真结果与实验结果的对比可以看出,保温筒的初始温度为13℃,刚开始温度上升缓慢,60 min开始温升速率较快,190 min以后温升速率减慢,同时数值模拟值开始低于物理实验值,整体来看,抗高温保温筒内部的数值模拟值与物理实验值的升温曲线基本一致,最大相对误差 $\leq 10\%$ ,说明模拟结果比较准确,可进一步用于保温筒的温度场、储热量的分析。

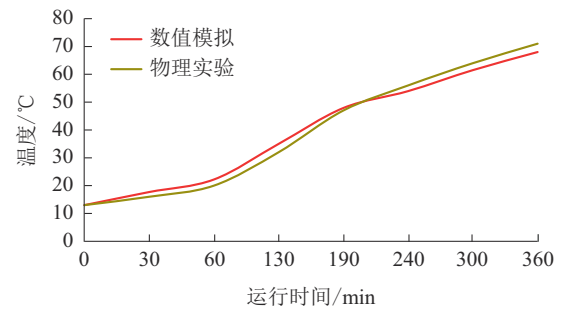


图4 实验测试及模拟结果

Fig.4 Experimental test and simulation results

### 3.2 上、下吸热体耦合长度对电路板温度的影响

就相变材料而言,无论是显热储热还是潜热储热,相变材料的质量对储热量而言是非常重要的影响因素。相变材料质量的变化可以由长度来表示,由于受抗高温保温筒总长度的限制,吸热体总长度限制在650 mm,除上、下吸热体耦合长度外,其余参数均不变,相变材料种类选择熔点为41.6℃的石蜡。图5显示了保温筒内部、上吸热体、下吸热体及电路板的温度随吸热体耦合长度的变化情况。

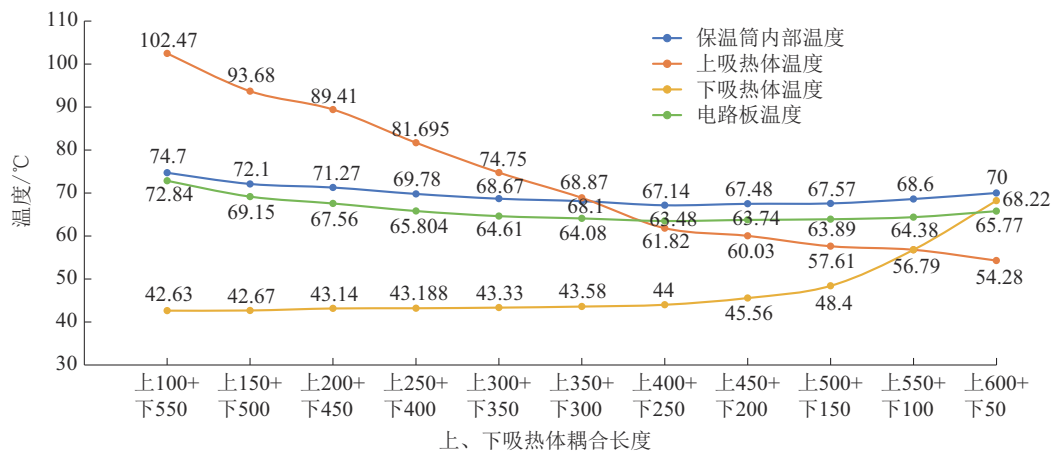


图5 温度随上下吸热体耦合长度变化曲线

Fig.5 Diagram of temperature variation with coupling length of upper and lower endothermers

上吸热体长度从100~600 mm变化,随着上吸热体长度的不断增加,6 h后的终止温度逐渐减小,从长度100 mm时的102.47 °C逐渐降至长度600 mm时的54.28 °C,可见随着相变材料质量的增加,上吸热体的储热能力逐渐加大,能够储存更多的环境漏热,其中在上吸热体长度100~400 mm范围内,上吸热的降温速率基本不变,而在400~600 mm之间,降温速率明显减缓,这是由于随着相变材料长度的增大,吸热体热阻增大,导致储热速率降低。图6显示不同长度上吸热体的固相体积百分数随着时间变化情况,上吸热体长度100~350 mm范围内,均已完全发生相变潜热,并且完成潜热的时间逐渐延长,从上吸热体长度400 mm开始,相变过程存在固相剩余,潜热利用率为96.7%,随着长度的继续增加,潜热利用率逐渐减小,长度600 mm时潜热利用率为79%。

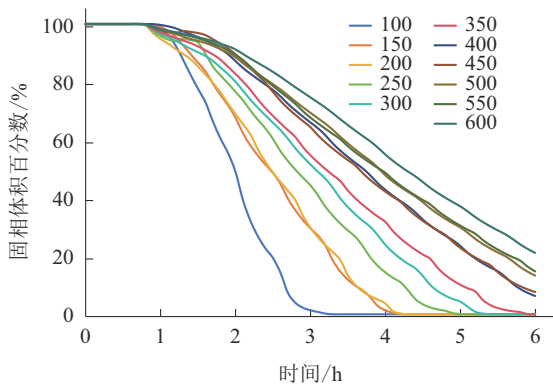


图6 上吸热体固相体积百分数随时间变化曲线  
Fig.6 Time dependent curve of solid phase volume fraction of upper endothermic body

对应的下吸热体长度从550~50 mm变化,随着下吸热体长度的不断减小,6 h后的终止温度逐渐升高,从长度550 mm时的42.63 °C逐渐升高至长度50 mm时的68.22 °C,当长度减小至250 mm时,吸热体热阻减小,温升速率明显增加。图7显示不同长度的下吸热体,其固相体积百分数随着时间变化的情况,在下吸热体长度550~150 mm范围内,相变过程均存在固相剩余,当长度减小至100 mm以下时完全相变。

通过电路板温度和保温筒内部温度随上、下吸热体耦合长度变化来看,在上吸热体400 mm、下吸热体250 mm时,电路板最低温度为63.48 °C,此时

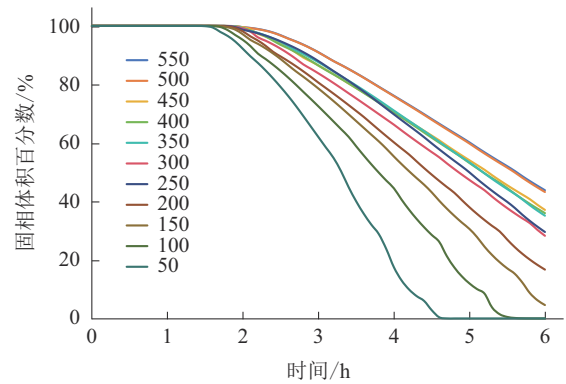


图7 下吸热体固相体积百分数随时间变化曲线  
Fig.7 Time dependent curve of solid phase volume fraction of lower absorber

对应保温筒内部最低温度67.14 °C,可见此时控温效果最好,该组长度为最佳耦合长度。

进一步分析了上、下吸热体的储热量随耦合长度变化的情况,储热量主要包括两方面,一是相变材料的固相和液相显热储热,二是相变材料潜热储热。显热储热量和潜热储热量分别由式(6)、(7)求解:

$$Q_s = c_s m_s (T_p - T_0) + c_l m_l (T_f - T_p) \quad (6)$$

$$Q_L = m_l L_h \quad (7)$$

式中:  $Q_s$ ——显热吸热量;  $Q_L$ ——潜热吸热量;  $m_s$ ——固态相变材料质量;  $m_l$ ——液态相变材料质量;  $c_s$ ——固态相变材料比热容;  $c_l$ ——液态相变材料比热容;  $T_0$ 、 $T_p$ 、 $T_f$ ——分别为相变材料初始温度、相变温度和最终温度;  $L_h$ ——相变潜热。

由表2可以看出,当上吸热体400 mm、下吸热体250 mm时,总储热量最大,为101.68 kJ,其中上吸热体显热储热量26.5 kJ,上吸热体潜热储热量47.50 kJ,下吸热体显热储热量6.04 kJ,下吸热体潜热储热量21.64 kJ。

### 3.3 相变材料种类对电路板温度的影响

在探究不同相变材料对抗高温保温筒内电路板温度的影响过程中,按照材料的组成选择了4种相变材料,其中有机相变材料选择了熔点分别为41.6 °C的低熔石蜡和72.8 °C的中熔石蜡,无机相变材料选择了熔点为61.1 °C的水合盐,金属相变材料选择了熔点为78.7 °C的伍德合金,4种相变材料的物性参数见表3。

在150 °C环境中工作6 h后,根据计算结果发现,低熔石蜡对电路板的控温效果最好,电路板终止温度为63.48 °C。上、下吸热体的温度也最低,分

表2 上下吸热体耦合长度吸热量统计

Table 2 Statistical table of heat absorption by coupling length of upper and lower heat absorbers

上吸热体 长度/mm	下吸热体 长度/mm	上吸热体潜热 利用率/%	下吸热体潜热 利用率/%	上吸热体吸热量/kJ		下吸热体吸热量/kJ		上下吸热体总 吸热量/kJ
				显热量	潜热量	显热量	潜热量	
100	550	100	56.20	11.77	12.28	9.99	37.96	72.00
150	500	100	56.80	15.77	18.42	9.17	34.87	78.24
200	450	100	62.90	19.81	24.56	9.35	34.76	88.48
250	400	100	64.00	22.01	30.70	8.47	31.44	92.62
300	350	100	64.90	23.44	36.84	7.56	27.89	95.74
350	300	100	72.00	24.48	42.98	7.40	26.52	101.38
400	250	96.70	70.50	26.50	47.50	6.04	21.64	101.68
450	200	91.40	83.30	23.50	50.51	6.08	20.46	100.54
500	150	86.70	95.50	23.27	53.22	5.81	17.59	99.88
550	100	85.20	100	23.95	57.56	5.25	12.28	99.04
600	50	79.00	100	23.19	58.21	3.44	6.14	90.98

表3 4种相变材料物性参数

Table 3 Physical properties parameters of four phase change materials

相变材料	熔点/ ℃	相变潜 热/(kJ· kg <sup>-1</sup> )	导热系 数/[W· (m·K) <sup>-1</sup> ]	密度/ (kg· m <sup>-3</sup> )	恒压比 热容/[J· (kg·K) <sup>-1</sup> ]
水和盐固态	61.1	190.4	0.5	1485	1930
水和盐液态	—		0.73	1485	1930
伍德合金固态	78.7	33.04	18.8	9580	184
伍德合金液态	—		18.8	9580	184
低熔石蜡固态	41.6	194.6	0.15	920	1930
低熔石蜡液态	—		0.15	785	2380
中熔石蜡固态	72.8	251.4	0.2	860	2000
中熔石蜡液态	—		0.2	860	2000

别为61.82、44℃(见表4)。

### 3.4 4种相变材料吸热量分析

表5为4种相变材料吸热量统计表,图8展示了

表4 4种相变材料热管理最终温度

Table 4 Final temperature for thermal management of four phase change materials

相变材料	上吸热 体温 度/℃	下吸热 体温 度/℃	电路板 温度/ ℃	6h上吸热 体固相体 积比/%	6h下吸热 体固相体 积比/%
水和盐	64.7	58.21	66.27	60.50	92.60
伍德合金	78.39	73.11	74.4	60.70	100
低熔石蜡	61.82	44	63.48	3.30	29.50
中熔石蜡	74.34	69.32	70.72	68	97

4种相变材料的显热及潜热储热量柱状图。在整个储热过程中,水和盐总储热量为103.31 kJ,其中上吸热体显热量41.19 kJ,上吸热体潜热量35.91 kJ,潜热占比46.6%,下吸热体显热量22.01 kJ,下吸热体潜热量4.2 kJ,潜热占比16%。伍德合金总储热量为91.9 kJ,其中上吸热体显热量33.09 kJ,上吸热体潜热量40 kJ,潜热占比54.7%,下吸热体显热量18.81 kJ,下吸热体未发生潜热储热。低熔石蜡总储热量为101.58 kJ,其中上吸热体显热量23.88 kJ,上吸热体潜热量47.5 kJ,潜热占比66.5%,下吸热体显热量8.56 kJ,下吸热体潜热量21.64 kJ,潜热占比71.6%。中熔石蜡总储热量为70.65 kJ,其中上吸热体显热量30.05 kJ,上吸热体潜热量22.25 kJ,潜热占比42.5%,下吸热体显热量17.05 kJ,下吸热体潜热量1.3 kJ,潜热占比7.1%。

水和盐和低熔石蜡的总吸热量相近,低熔石蜡的上、下吸热体潜热占比均较高,主要归功于较低

表5 4种相变材料吸热量统计

Table 5 Statistical table for heat absorption of four phase change materials

相变材料	上吸显 热量/kJ	上吸潜 热量/kJ	下吸显 热量/kJ	下吸潜 热量/kJ	总储热 量/kJ
水和盐	41.19	35.91	22.01	4.20	103.31
伍德合金	33.09	40.00	18.81	0	91.90
低熔石蜡	23.88	47.50	8.56	21.64	101.58
中熔石蜡	30.05	22.25	17.05	1.30	70.65

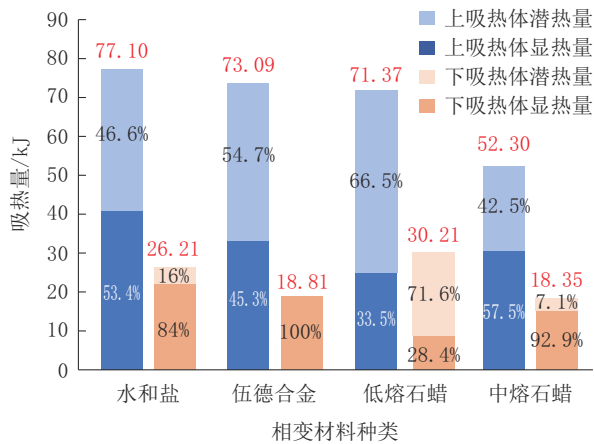


图 8 4 种相变材料上下吸热量统计  
Fig.8 Statistical chart of up-down heat absorption of four phase change materials

的熔点,但水和盐的密度是低熔石蜡的 2 倍,导热系数是低熔石蜡的 4 倍,所以整体总储热量比低熔石蜡略高一些。伍德合金具有较高的熔点,但发生相变潜热的时间最短,上吸热体依然具有较好的相变潜热比例,上吸热体吸热量甚至比低熔石蜡还高,主要归功于较高的导热系数和较高的密度。伍德合金下吸热体平均温度 73.11 °C,还未达到熔点,全部为显热吸热。

两种不同熔点的石蜡相比,低熔石蜡总吸热量 101.58 kJ,比中熔石蜡高出 43.8%,反映出在选择相变材料时,要重点考虑相变材料的熔点,避免保温筒内电路板温度上升至安全温度时,相变材料刚发生相变潜热。选择的 4 种相变材料在 150 °C 环境中工作 6 h 后,为保证电路板温度  $\geq 80$  °C 的前提下,低熔石蜡更为合适。通过图 9 可以看出,随着环境温度继续升高,低熔石蜡完全相变继续以显热吸热,明显后续储热能力显著下降,环境温度升至 177 °C 后,水和盐逐渐对电路板的控温能力突显。

总体来看,低熔石蜡控温能力最好,其次是水和盐,伍德合金控温效果较前两者差很多,但又强于中熔石蜡。

### 3.5 温度分布

在确定了上、下吸热体最佳耦合长度和相变材料后,为了分析保温筒被动热管理中不同结构的热管理贡献,分别对无真空层无相变材料、有真空层无相变材料和有真空层有相变材料 3 种保温结构进行仿真计算,在保温筒内取一条轴向线段(如图 10

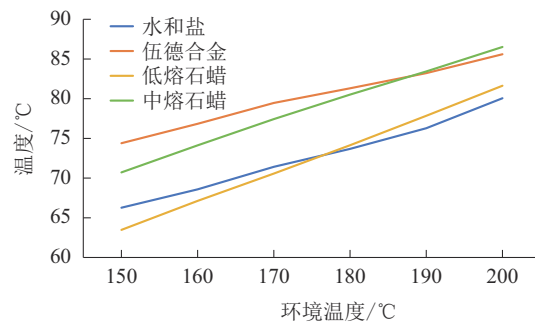


图 9 不同相变材料对电路板的控温效果随环境温度变化的影响

Fig.9 The influence of different phase change materials on the temperature control effect of circuit boards with changes in environmental temperature

所示),做出其上不同时刻的温度分布曲线(如图 11~13 所示),3 种不同结构下保温筒电路板温度随时间变化情况见图 14。

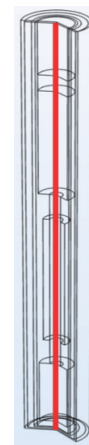


图 10 保温筒内部温度分布的轴向线段

Fig.10 The axial line segment of the temperature distribution inside the vacuum flask

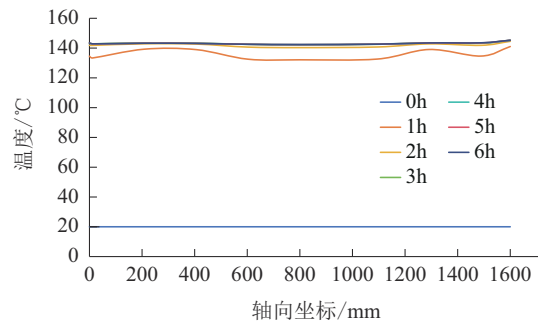


图 11 无真空无相变材料轴向温度分布

Fig.11 Axial temperature distribution without phase change materials and vacuum



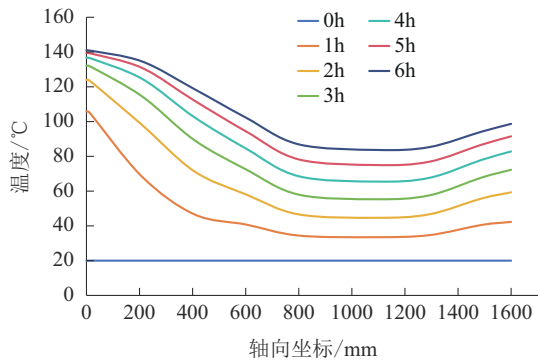


图12 有真空无相变材料轴向温度分布

Fig.12 Axial temperature distribution with vacuum bottle without phase change material

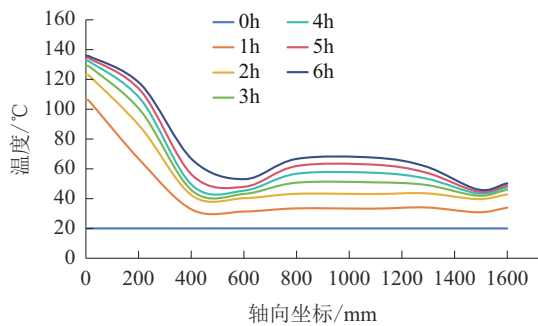


图13 有真空有相变材料轴向温度分布

Fig.13 Axial temperature distribution with phase change materials and vacuum

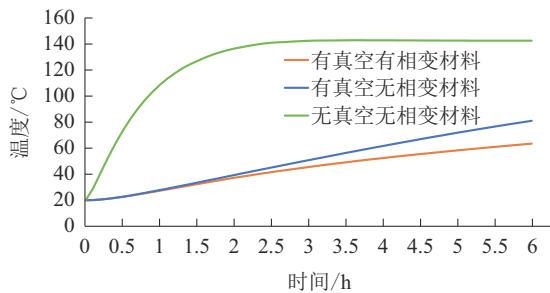


图14 不同结构保温筒电路板温度随时间变化

Fig.14 Temperature variation of circuit boards with different insulation cylinder structures over time

初始时刻保温筒整体处于 $20^{\circ}\text{C}$ ,在没有真空保温层和相变储热的情况下,2h内测井仪轴向上温度整体迅速升至 $142^{\circ}\text{C}$ ,在此基础上增加真空层工作6h后,电路板温度迅速降为 $81.05^{\circ}\text{C}$ ,控温效果提升43.14%,真空保温层隔热效果十分明显,由图12中的轴向温度分布可见,顶部开口处漏热严重,温度较高,底部端部相较于保温筒中部温度有明显升

高,也有一定程度漏热。在此基础上增加上、下吸热体进行热管理后,0~2h保温筒升温迅速,主要由于内外温差较大,大量热量以固体传热的方式进入保温筒内部。2h以后,上、下吸热体开始潜热储热,部分热流通过保温筒内部空气逐渐传导到中段,由图14中的电路板温度随时间变化情况来看,明显2h后含有吸热体的电路板温升速率减缓,6h后电路板最终温度为 $63.48^{\circ}\text{C}$ ,控温效果继续提升21.68%。由图13中的保温筒内部轴线温度分布可明显看出在上、下吸热体的位置,温度有明显下沉,结合保温筒不同时刻温度场云图(见图15),可见相变材料吸热体对保温筒的热管理作用明显。

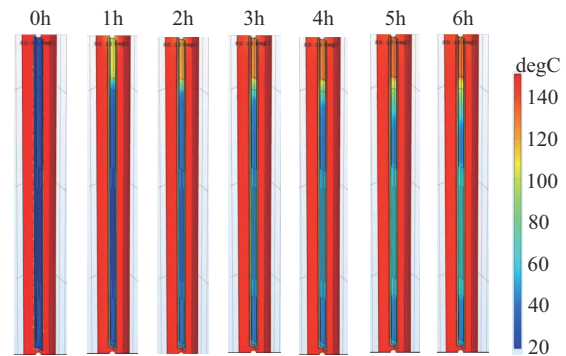


图15 保温筒温度分布云图

Fig.15 Cloud chart of temperature distribution of vacuum flask

### 3.6 上、下吸热体相态分析

对抗高温保温筒内相变材料的相变储热过程进行分析,可得到上、下吸热体相变材料的相变体积分数随时间变化曲线。图16是上吸热体储热过程中随时间变化的相态云图,初始阶段全部为蓝色,代表相变材料并未融化,其主要以显热的形式吸收来自高温环境的热量,由于上吸热体靠近顶部开口,受环境漏热影响严重,在70min开始发生相变,经过6h的持续储热,最终上吸热体潜热利用率96.7%(如图17所示),潜热储热容量即将利用殆尽。图18是下吸热体储热过程中随时间变化的相态云图,下吸热体靠近保温筒底部,同时吸收保温筒内来自上部的热传递和底部端部的环境漏热,在120min时开始发生相变,由相变随时间变化可以看出,下吸热体顶部最先开始发生相变,随着底部环境的持续漏热,下吸热体底部再开始相变,经过6h的持续储热,最终下吸热体整体潜热利用率70.5%(如图

19所示),可见下吸热体还有进一步的储热空间。

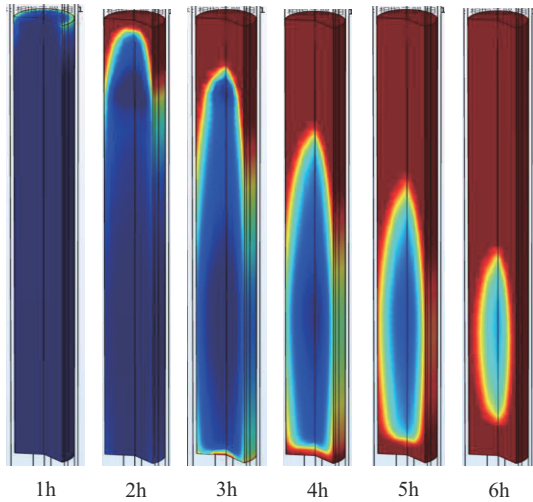


图 16 上吸热体相态变化云图

Fig.16 Cloud diagram of phase change of upper endothermic body

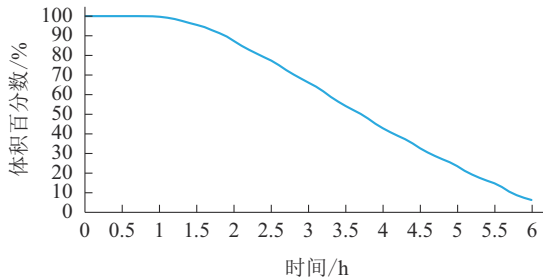


图 17 上吸热体固相体积分数变化曲线

Fig.17 Curve of percentage change of solid phase volume of upper endothermy

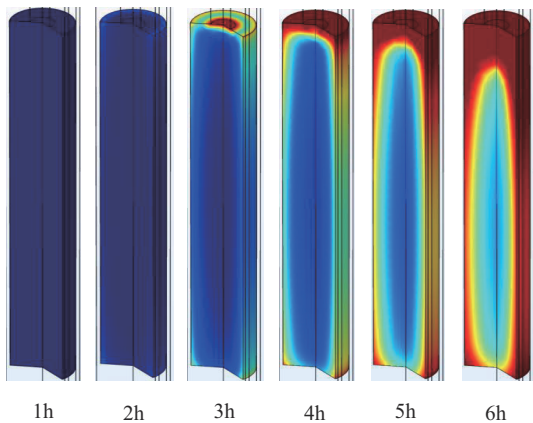


图 18 下吸热体相态变化云图

Fig.18 Cloud diagram of phase change of lower endothermic body

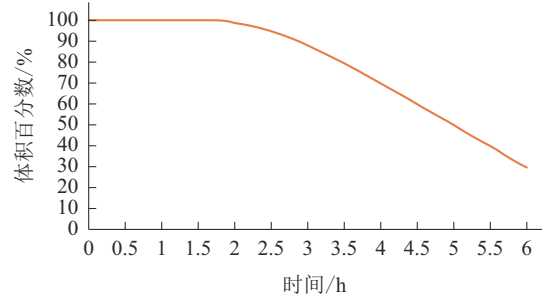


图 19 下吸热体固相体积分数变化曲线

Fig.19 Curve of percentage change of solid phase volume of upper endothermy

### 4 结论

(1)在吸热体总长控制在 650 mm 前提下,当上吸热体长度 400 mm、下吸热体长度 250 mm 时,控温效果最好,为最佳耦合长度。此时总储热量最大,为 101.68 kJ,其中上吸热体显热储热量 26.5 kJ,上吸热体潜热储热量 47.50 kJ,下吸热体显热储热量 6.04 kJ,下吸热体潜热储热量 21.64 kJ。

(2)相变材料优选方面,150 °C 环境下低熔石蜡潜热利用率较高,控温效果最好,水和盐次之,伍德合金控温效果较前两者差很多,但强于中熔石蜡。环境温度升至 177 °C 以后,水和盐的控温能力优于低熔石蜡。

(3)在保温筒被动热管理中,相比较于无真空隔热层和无上下吸热体的结构而言,真空隔热层结构电路板温度 81.05 °C,控温效果可提升 43.14%,相变吸热体结构电路板温度 63.48 °C,控温效果继续提升 21.68%。

(4)采用等效比热方程分析上、下吸热体相态体积变化情况,上吸热体 70 min 开始相变,相变潜热利用率 96.7%,下吸热体 120 min 开始相变,相变潜热利用率 70.5%,具有进一步储热空间。

(5)采用相变储能被动热管理的方式以提升“慧磁”测井仪耐温性能的方案可行,能够满足初温 20 °C 的“慧磁”测井仪在 150 °C 高温环境下工作 6 h,内部磁通门传感器等电子器件不超 80 °C 安全工作温度的指标要求。

### 参考文献 (References):

[1] Soprani S, Haertel J H K, Lazarov B S, et al. A design approach for integrating thermoelectric devices using topology optimization[J]. Applied Energy, 2016,176:49-64.  
 [2] Weerasinghe S R, Hughes T P. Thermal management of down-

- hole measuring tools using thermoelectric cooling: a numerical and experimental investigation [C]//12th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. Malaga, Spain: ASTFE, 2016:1654-1659.
- [3] Juan-Carlos J. Innovative thermal management of electronics used in oil well logging [D]. Atlanta: George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, 2004.
- [4] Pennewitz E, Kruspe T, Jung S, et al. Evaluation of sorbents at elevated temperatures for downhole application [J]. Chemical Engineering Transactions, 2012,29:1543-1548.
- [5] Verma S, Elias Q. Thermal management of electronics used in downhole tools [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, Texas, USA, 2012:SPE-159737-MS.
- [6] Aaron G. Active cooling for electronics in a wireline oil-exploration tool [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [7] 杜垚森,封优生,伍晓龙,等.深部地热能开发保温管技术研究现状及发展趋势[J].钻探工程,2022,49(6):138-145.  
DU Yaosen, FENG Yousheng, WU Xiaolong, et al. Research status and consideration of thermal insulation pipe technology for deep geothermal energy development [J]. Drilling Engineering, 2022,49(6):138-145.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 李超,黄小俊,肖彦新,等.井下仪器高温电路设计方法探析[J].化工管理,2015(14):121.  
LI Chao, HUANG Xiaojun, XIAO Yanxin, et al. Analysis on the design method of high temperature circuit for underground instruments [J]. Chemical Enterprise Management, 2015(14):121.
- [11] 张静,丁益民,陈念贻.相变储能材料的研究及应用[J].盐湖研究,2005,13(3):52-57,21.  
ZHANG Jing, DING Yimin, CHEN Nianyi. Studies and applications of phase change materials [J]. Journal of Salt Lake Research, 2005,13(3):52-57,21.
- [12] Sharma A, Tyagi V V, Chen C R, et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(2):318-345.
- [13] Agyenim F, Hewitt N, Eames P, et al. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS) [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010,14(2):615-628.
- [14] 叶锋,曲江兰,仲俊喻,等.相变储热材料研究进展[J].过程工程学报,2010,10(6):1231-1241.  
YE Feng, QU Jianglan, ZHONG Junyu, et al. Research advances in phase change materials for thermal energy storage [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(6): 1231-1241.
- [15] 商博锋.相变材料导热强化及其在高温测井仪热管理中的应用研究[D].武汉:华中科技大学,2019.  
SHANG Bofeng. Thermal enhancement of phase change materials and its application in thermal management of high-temperature logging tools [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [16] Holman J P. Heat transfer [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [17] Iten M, Liu S L, Shukla A. Experimental validation of an air-PCM storage unit comparing the effective heat capacity and enthalpy methods through CFD simulations [J]. Energy, 2018, 155:495-503.
- [18] Zhang Y. Modified computational methods using effective heat capacity model for the thermal evaluation of PCM outfitted walls [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2019,108:104278.
- [19] Yang H T, He Y Q. Solving heat transfer problems with phase change via smoothed effective heat capacity and element-free Galerkin methods [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010,37(4):385-392.
- [20] 薛志波,商博锋,张嘉伟,等.高温井下测井仪热管理系统数值仿真分析[J].钻采工艺,2021,44(5):92-96.  
XUE Zhibo, SHANG Bofeng, ZHANG Jiawei, et al. Numerical simulation analysis of thermal management system of high temperature well logging Tool [J]. Drilling & Production Technology, 2021,44(5):92-96.
- [21] Shang B F, Ma Y P, Hu R, et al. Passive thermal management system for downhole electronics in harsh thermal environments [J]. Applied Thermal Engineering, 2017,118:593-599.
- [22] Lan W, Zhang J W, Peng J L, et al. Distributed thermal management system for downhole electronics at high temperature [J]. Applied Thermal Engineering, 2020,180:115853.
- [23] 王宇君,薛志波,蓝威,等.测井仪专用保温瓶传热实验及仿真研究[J].工程热物理学报,2021,42(10):2649-2656.  
WANG Yujun, XUE Zhibo, LAN Wei, et al. Experimental and simulation study on heat transfer of vacuum flask for logging tools [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021,42(10):2649-2656.
- [24] 蓝威,彭嘉乐,马一鸣,等.高温井下测井仪分布式储热系统仿真[J].工程热物理学报,2021,42(9):2361-2366.  
LAN Wei, PENG Jiale, MA Yiming, et al. Numerical simulation of distributed heat storage system for logging tools in high-temperature downhole [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021,42(9):2361-2366.

(编辑 荐华)