

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2020131

引用格式: 刘均一, 陈二丁, 李光泉, 等. 基于相变蓄热原理的深井钻井液降温实验研究 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(1): 53-58.

LIU Junyi, CHEN Erding, LI Guangquan, et al. Experimental study of drilling fluid cooling in deep wells based on phase change heat storage [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(1): 53-58.

# 基于相变蓄热原理的深井钻井液降温实验研究

刘均一<sup>1</sup>, 陈二丁<sup>1</sup>, 李光泉<sup>2</sup>, 袁丽<sup>1</sup>

(1. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257100; 2. 中石化石油工程技术服务有限公司, 北京 100029)

**摘要:** 针对深部油气钻探开发中钻井液、井下仪器抗高温稳定性较差的问题, 首次将相变材料应用于钻井液中, 开展了基于相变蓄热原理的深井钻井液降温实验研究。在评价相变材料热物性的基础上, 分析了相变材料的蓄热控温特性; 对比评价了相变材料对钻井液流变滤失性能的影响; 采用自制的钻井液循环模拟实验装置, 测试了钻井液降温性能实验曲线。结果表明, 1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>相变材料的相变温度为 120~145 °C, 相变潜热为 90.3~280.6 J/g; 2<sup>#</sup>相变材料的相变潜热最大, 相变蓄热特性最优, 其与钻井液的配伍性能良好, 加量达 12% 时钻井液的黏度、切力和滤失量基本不变, 钻井液循环温度约可降低 20 °C, 且具有良好的重复利用价值。研究结果表明, 利用相变材料的“相变蓄热原理”可以降低钻井液的循环温度, 为深井高温钻井液降温提供了新的技术思路。

**关键词:** 钻井液; 降温; 相变材料; 相变蓄热; 模拟试验

中图分类号: TE254

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2021)01-0053-06

## Experimental Study of Drilling Fluid Cooling in Deep Wells Based on Phase Change Heat Storage

LIU Junyi<sup>1</sup>, CHEN Erding<sup>1</sup>, LI Guangquan<sup>2</sup>, YUAN Li<sup>1</sup>

(1. Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257100, China;  
2. Sinopec Oilfield Service Corporation, Beijing, 100029, China)

**Abstract:** Focusing on such problems as poor high-temperature stability of drilling fluids and downhole instruments in the development of deep gas and oil, phase change materials were introduced into drilling fluids for the first time to model the cooling of drilling fluids in deep wells based on phase change heat storage principle. First, the heat storage characteristics of the phase change materials were investigated on the basis of evaluating the thermophysical properties of the phase change materials. Then, the influence of phase change materials on the rheological and filtration properties of drilling fluids was comparatively evaluated. Finally, the experimental curves for the cooling performance of drilling fluids were measured using a self-made experimental device of drilling fluid circulating simulation. The results showed that the phase change temperature and the latent heat of phase change for the phase change materials 1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup> were approximately 120~145 °C and 90.3~280.6 J/g, respectively; and the phase change material 2<sup>#</sup> displayed the highest latent heat and the best heat storage performance of the phase change, exhibiting a compatibility with drilling fluid. Specifically, the viscosity, shear force, and filtration of the drilling fluids were basically unchanged when the concentration of the phase change material 2<sup>#</sup> increased to 12%, and the circulating temperature of the drilling fluids could be reduced by about 20 °C, correspondingly. In addition, the phase change material 2<sup>#</sup> exhibited excellent reuse properties. In conclusion, the circulating temperature of the drilling fluids could be reduced by referring to the principle of phase change heat storage of phase change materials, which could provide a new technical thinking to apply to cooling technologies for high-temperature drilling fluids in deep wells.

**Key words:** drilling fluid; cooling; phase change material; phase change heat storage; simulation testing

深部油气钻探开发过程中, 面临着越来越多的高温、超高温问题<sup>[1-3]</sup>, 塔里木盆地顺北、顺南地区

收稿日期: 2020-05-05; 改回日期: 2020-11-09。

作者简介: 刘均一 (1988—), 男, 山东淄博人, 2010 年毕业于中国石油大学 (华东) 石油工程专业, 2016 年获中国石油大学 (华东) 油气井工程专业博士学位, 高级工程师, 主要从事钻井液完井液新技术方面的研究工作。E-mail: danieliu1988@126.com。

基金项目: 中国石油化工集团有限公司科技攻关项目“钻井液降温技术研究与应用” (编号: JP20005) 部分研究内容。

的井底温度一般在 180~260 ℃, 钻井液各组分在高温下极易发生分散、聚结、降解和交联等反应, 造成钻井液流变滤失性能剧变, 甚至导致钻井作业无法正常进行<sup>[4~5]</sup>。高温超高温环境也会影响钻井工具、随钻测量和测井等仪器设备的使用寿命<sup>[6~7]</sup>。此外, 干热岩高温井的井底温度多在 200 ℃ 以上, 甚至超过 300 ℃<sup>[8]</sup>。因此, 深层油气、干热岩等高温高压极端恶劣环境对钻井液、井下仪器设备带来了严峻考验, 限制了深层油气、地热清洁资源的勘探开发。

为了提高深井钻井作业的效率和安全, 国内外主要采用自然冷却、混合低温介质冷却和冷却装置强制冷却等地面降温方法, 通过降低井筒返出钻井液的温度来降低钻井液的循环温度, 并在高温深井、地热井和冻土带等得到了应用<sup>[9~11]</sup>。但上述地面降温方法只是通过降低钻井液入口处温度来间接降低井筒钻井液循环温度, 且存在设备投入大、能耗高和冷却介质消耗大等问题, 无法完全满足深井高温钻井液的降温要求。

相变材料 (phase change material, PCM) 是通过自身相态的变化对热能进行存储, 从而对材料周围环境温度进行调节的一种新型功能材料, 广泛应用于航天、军事、建筑和制冷等领域<sup>[12]</sup>。目前, 相变材料在钻井工程中的研究与应用主要集中在低水化热水泥浆方面<sup>[13]</sup>, 未见相变材料在钻井液中的研究与应用。因此, 笔者首次将相变材料应用于钻井液中, 在评价相变材料的蓄热控温性的基础上, 通过钻井液降温性能模拟实验验证了利用相变材料的相变蓄热特性降低井筒钻井液循环温度的可行性, 为深井高温钻井液降温提供了新的技术思路。

## 1 相变材料特性评价与分析

在一定的相变温度下, 相变材料能够在不同的相态之间相互转变, 转变时吸收或释放大量的相变潜热。根据相变类型, 相变材料可分为固–固相变材料、固–液相变材料、固–气相变材料和液–气相变材料等 4 类, 其中, 固–气、液–气相变材料在相变过程中产生气体, 造成材料体积大幅变化, 实际应用较少。相变过程具有以下特征: 1) 相变潜热较大, 比显热储存材料(如水泥、岩石等)单位体积储热能力高 40 倍以上; 2) 在相变过程中保持介质温度几乎不变; 3) 清洁环保, 可重复利用<sup>[14]</sup>。

### 1.1 优选原则

基于上述特征, 将相变材料引入钻井液中, 探索

利用其在相变过程中吸收相变潜热并保持温度稳定(相变蓄热)的特性, 实现降低井筒钻井液循环温度的目标。钻井施工过程中, 将一定量的相变材料添加到钻井液中, 随钻井液循环进入井筒, 当钻井液循环温度达到相变温度后, 相变材料发生相态转变, 吸收大量的相变潜热, 将能量储存在相变材料中, 达到降低钻井液循环温度的目的; 钻井液上返过程中, 温度降低, 相变材料发生可逆相态变化, 释放出井下储存的热量, 达到降低钻井液温度的目的。

将相变材料作为钻井液降温用处理剂, 需要满足以下原则: 1) 与钻井液配伍性好, 相变前后对钻井液流变性、滤失性等无不利影响; 2) 热吸收能力强, 相变潜热大, 且具有合适的相变温度, 能够满足深井高温钻井液的降温要求; 3) 具有良好的化学稳定性和热稳定性, 在井下多次相变蓄热/放热过程中不发生分解、老化、相分离等问题; 4) 相变材料粒径属于微纳米级别, 且相变可逆性好, 可反复使用, 能够随钻井液循环使用, 而不被钻井固控系统筛除。此外, 相变材料还应来源丰富, 成本可接受, 使用安全, 满足无毒、不易燃等要求。

基于上述优选原则, 优选了 3 种相变材料, 测试了上述相变材料的热物性, 并评价了其相变蓄热控温特性, 为后续钻井液降温模拟实验提供了参考。

### 1.2 热物性评价

利用差示扫描量热法 (differential scanning calorimetry, DSC), 采用 DSC-3 型差示扫描量热仪, 测试了 3 种相变材料的相变温度、相变潜热等热物性参数。<sup>1#</sup>相变材料是一种基于石蜡/膨胀石墨的复合相变材料, 属于固–液相变材料;<sup>2#</sup>相变材料是一种以异戊四醇、新戊二醇为主要组分的固–固相变材料;<sup>3#</sup>相变材料是一种以相变材料赤藓糖醇为囊芯、高分子共聚物为囊壁的微胶囊, 属于固–液相变材料。

测试方法: 1) 温度以 10 ℃/min 的升幅从 30 ℃ 升至 200 ℃; 2) 200 ℃ 恒温 10 min; 3) 温度以 10 ℃/min 的降幅从 200 ℃ 降至 30 ℃; 4) 30 ℃ 恒温 10 min; 5) 温度以 10 ℃/min 的升幅从 30 ℃ 升至 200 ℃, 得到 DSC 曲线。根据 ICTA 标准化委员会规定, DSC 曲线上升为放热峰, 向下为吸热峰, 前基线延长线与峰前沿最大斜率处切线的交点即为熔点, 取熔化再结晶的结晶峰作为特征峰进行分析, 即可获得相变温度、相变潜热等热物性参数<sup>[15]</sup>。3 种相变材料的热物性参数测试结果见表 1。

表1 相变材料的热物性参数测试结果

Table 1 Test results of the thermophysical parameters of phase change materials

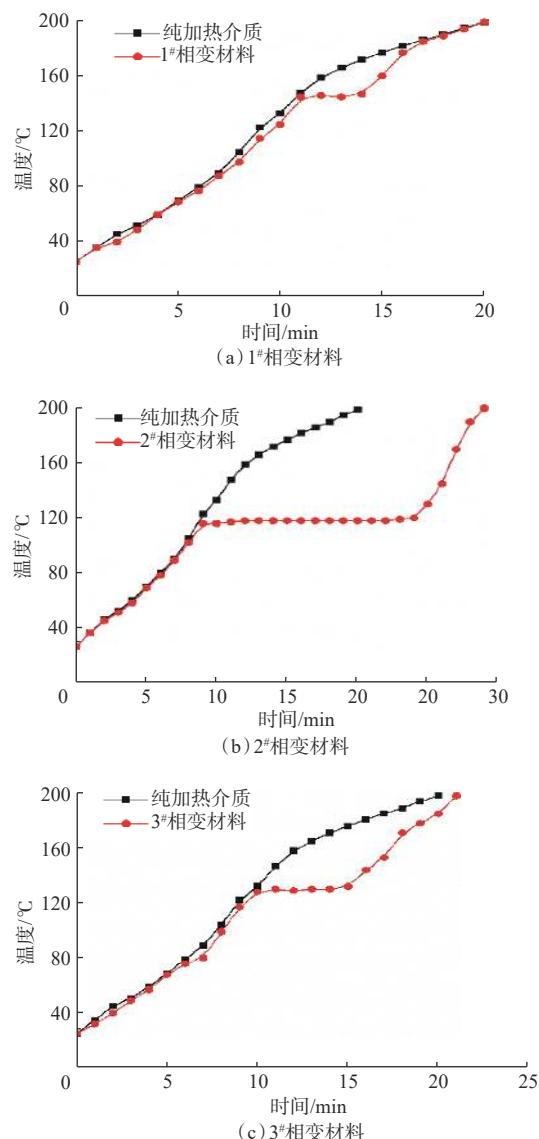
相变材料	产品代号	$D_{90}/\mu\text{m}$	相变类型	相变温度/℃	相变潜热/(J·g <sup>-1</sup> )
1 <sup>#</sup>	GPC-1	32.1	固-液	145	90.3
2 <sup>#</sup>	ALC-1	28.4	固-固	120	280.6
3 <sup>#</sup>	EPCM-C	12.7	固-液	132	126.2

从表1可以看出,1<sup>#</sup>相变材料的相变温度为145℃,相变潜热为90.3 J/g,具有热导率大、环境友好和安全等特点,但相变潜热相对较低;2<sup>#</sup>相变材料的相变温度为120℃,相变潜热280.4 J/g,相变温度适中,相变潜热较高,且成本较低、使用寿命长、环境友好;3<sup>#</sup>相变材料的相变温度为132℃,相变潜热126.2 J/g,既具有相变材料的相变蓄热作用,还能避免相变材料对工作介质的不利影响,但存在微胶囊耐温稳定性不足、成本高等问题。1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>相变材料的 $D_{90}$ 均小于35 μm,可通过平均孔径为75 μm的200目振动筛筛选,满足钻井液循环利用要求。此外,3种相变材料的成本为35 000~50 000元/t,稍高于目前常用的抗高温钻井液处理剂,但上述3种相变材料并非专用于钻井液领域,后续可通过研发低成本的钻井液降温专用相变材料来提高其经济性。

### 1.3 蓄热控温特性评价

利用自制的高温高压钻井液沉降稳定性评价实验装置,以高温导热油为加热介质,测试得到3种相变材料的蓄热控温特性曲线。测试方法为:1)将纯加热介质的温度逐步升至200℃,每隔1 min记录一次温度,得到纯加热介质的升温曲线;2)在纯加热介质中加入12.0%的相变材料,混合均匀后循环加热,每隔1 min记录一次温度,得到相变材料的蓄热控温特性曲线。

3种相变材料的蓄热控温特性曲线如图1所示。分析可知,随着加热时间增长,纯加热介质的温度逐步升高,约20 min后升至200℃;加入1<sup>#</sup>相变材料后,随着加热时间增长,加热介质的温度逐步升高,温度约升至145℃(相变温度)时,材料发生相态转变,吸收大量的相变潜热,保持加热介质的温度恒定,形成了一个约4 min的“相变恒温平台”;加入2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>相变材料后,也得到了类似的蓄热控温特性曲线,形成了一定时长的“相变恒温平台”。

图1 1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>相变材料的蓄热控温特性曲线Fig. 1 Heat storage characteristic curves of phase change materials 1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>

进一步分析图1可知,相变恒温平台的温度是由相变材料的相变温度决定的,1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>相变材料的恒温平台的温度分别约为145, 120和130℃。恒温平台的保持时长与相变材料的相变潜热直接相关,2<sup>#</sup>相变材料的相变潜热最大,恒温平台保持时间最长(约16 min);3<sup>#</sup>相变材料的相变潜热次之,保持时长约6 min。

### 2 配伍性评价

相变材料作为钻井液降温用处理剂,必须与常用钻井液具有良好的配伍性。因此,选用了常用的抗高温水基钻井液HT-MUD-1,其配方为2.0%膨润

土+0.8% HT-POLY+1.5%HT-FR+2.0%HT-LSA+3.5% HT-SEAL+0.5%HT-CSP+1.0%HT-LUBE+重晶石(密度 1.50 kg/L), 其中, 聚合物 HT-POLY 用作增黏、提切剂; 抗高温抗盐降滤失剂 HT-FR 用于提高钻井液的滤失造壁性能; 低荧光沥青 HT-LSA 和成膜封堵剂 HT-SEAL 主要用于增强钻井液的封堵防塌性能; 降黏剂 HT-CSP 用于调整钻井液的黏度和切力; 聚

合醇类润滑剂 HT-LUBE 可以增强钻井液的抑制性与润滑性。通过实验测试了钻井液 HT-MUD-1 加入相变材料前后的流变性、滤失性等基本性能, 结果见表 2。其中, HT-MUD-2 配方为: HT-MUD-1+12.0%<sup>1#</sup>相变材料; HT-MUD-3 配方为: HT-MUD-1+12.0%<sup>2#</sup>相变材料; HT-MUD-4 配方为: HT-MUD-1+12.0%<sup>3#</sup>相变材料。

表 2 钻井液流变性、滤失性测试结果

Table 2 Test results of the rheological and filtration properties of drilling fluids

配方	实验条件	表观黏度/(mPa·s)	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa	静切力/Pa		API滤失量/mL	高温高压滤失量/mL	滤饼厚度/mm	pH值
					初切	终切				
HT-MUD-1	老化前	41.0	31.0	10.0	5.0	8.0	3.0	12.4	2.2	9.0
	老化后	43.0	30.0	13.0	4.5	9.0	3.2			
HT-MUD-2	老化前	51.0	39.0	12.0	5.5	9.0	2.8	11.8	2.0	9.0
	老化后	53.0	38.5	14.5	5.5	10.0	3.0			
HT-MUD-3	老化前	47.5	36.0	11.5	5.0	9.0	3.2	11.6	2.0	9.0
	老化后	50.5	37.0	13.5	5.0	10.5	2.6			
HT-MUD-4	老化前	42.5	32.0	10.5	5.0	8.5	3.2	12.0	2.2	9.0
	老化后	43.5	31.0	12.5	5.0	9.5	3.0			

注: 老化条件为 180 °C/16 h, 高温高压滤失条件为 150 °C/3.5 MPa。

从表 2 可以看出, 抗高温水基钻井液 HT-MUD-1 加入 1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>相变材料后, 老化前后的黏度、切力均略有增大, API 滤失量、高温高压滤失量和滤饼厚度都变化不大, 说明 1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>相变材料与钻井液的配伍性良好, 加量达到 12.0% 时钻井液的流变性、滤失性仍满足钻井施工要求, 可以作为钻井液降温用处理剂。其中, 3<sup>#</sup>相变材料对钻井液的流变性、滤失性的影响最小, 这是因为其是相变微胶囊材料, 避免了相变材料与钻井液直接接触; 但“额外”的微胶囊壁传热过程, 也降低了相变材料的相变潜热等, 影响了相变材料的相变蓄热作用效果。因此, 建议研发专用于钻井液降温的高导热、高强度和低成本相变微胶囊材料。

### 3 基于相变材料的钻井液降温实验

研究表明, 随着工作环境温度升高, 相变材料发生可逆的相态转变, 可吸收大量热量, 形成较宽的相变恒温平台, 达到“相变控温”效果。因此, 利用自制的钻井液循环模拟实验装置, 将相变材料加入到抗高温钻井液中, 评价相变材料在钻井液环境中的降温性能, 并验证利用“相变蓄热原理”降低井筒钻井液循环温度的可行性。

#### 3.1 钻井液循环模拟实验

自制钻井液循环模拟实验装置的基本结构如图 2 所示。实验时, 用真空泵将钻井液泵入到模拟钻柱中进行循环; 井筒用加热套包裹, 3 个温度传感器串联控制加热套; 环空出口处装有压力控制阀, 可通过控制环空出口压力, 调控钻井液循环压力。

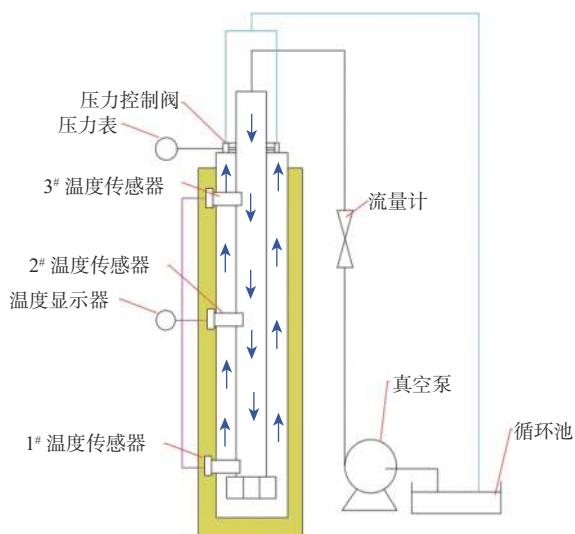


图 2 钻井液循环模拟实验装置的基本结构

Fig.2 Basic structure of the experimental device for drilling fluid circulating simulation

钻井液循环模拟实验方法如下: 1) 采用未加相变材料的钻井液, 进行井筒循环流动, 3 个温度传感器控制加热套, 使井底钻井液温度达到 180 ℃; 2) 手动调节加热套, 保持温度恒定, 关闭温度传感器的伺服控制; 3) 钻井液中加入相变材料后进行循环流动, 连续记录井底温度传感器读数, 得到钻井液循环降温曲线。

### 3.2 钻井液降温性能

按照上述钻井液循环模拟实验方法, 采用抗高温水基钻井液 HT-MUD-1 作为实验钻井液, 测试得到加入 1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>相变材料的钻井液循环降温曲线。其中, 2<sup>#</sup>相变材料加入钻井液后的降温曲线如图 3 所

示 (*A* 为第一次调温点, *B* 为相变材料第一次加入点, *C* 为第一次降温终点, *D* 为第二次调温点, *E* 为相变材料第二次加入点, *F* 为第二次降温终点)。由图 3 可知, 井底钻井液温度达到 180 ℃ 后, 抗高温钻井液加入 2<sup>#</sup>相变材料进行循环时, 相变材料在相变温度附近发生相态变化, 吸收大量的热量, 即发生“相变蓄热”, 井底钻井液循环温度随之降低; 而且相变材料加量越大, 井底钻井液循环温度的降低幅度越明显。加量为 3% 时, 井底钻井液循环温度约降低了 5 ℃; 相变材料加量增加至 6%, 9%, 12% 和 15% 时, 井底钻井液循环温度分别约降低了 9, 16, 20 和 24 ℃。

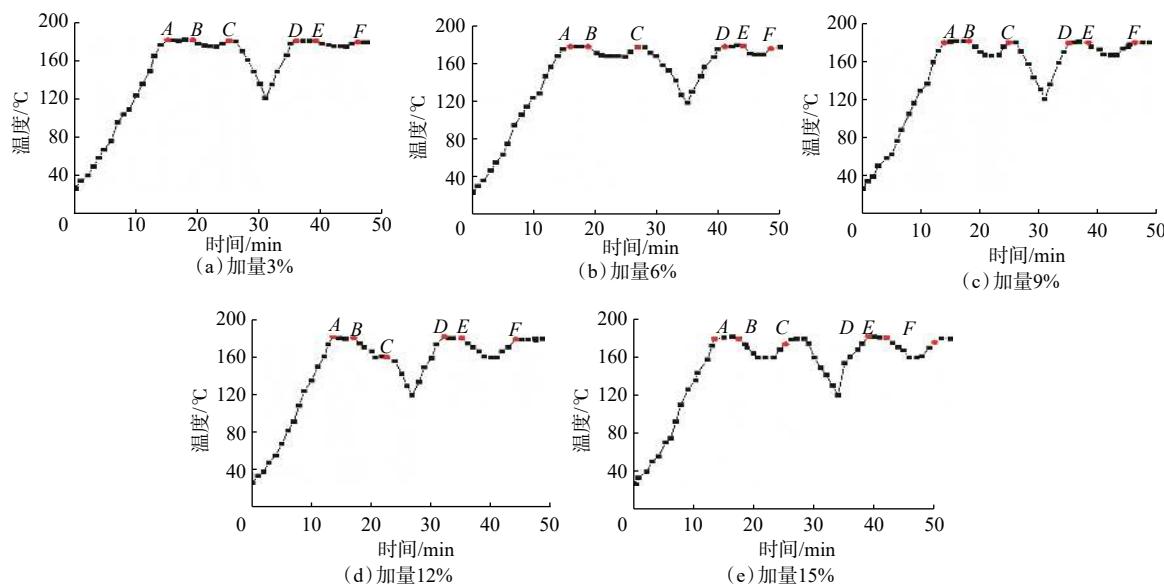


图 3 2<sup>#</sup>相变材料不同加量的钻井液循环降温曲线

Fig.3 Circulating cooling curves of drilling fluids with different concentrations of phase change material 2<sup>#</sup>

为了模拟在连续循环条件下相变材料的钻井液降温性能, 将第一次降温实验的抗高温钻井液(已加入 2<sup>#</sup>相变材料)冷却至 60 ℃ 左右后, 再次泵入循环, 完成第二次降温实验。进一步分析图 3 可知, 由于相变过程是一个可逆的“蓄热-放热”过程, 再次泵入井筒循环, 仍表现出良好的钻井液降温性能, 2 次降温实验的降温效果相差不超过 2 ℃, 具有较好的可重复利用性能, 能够满足现场钻井液连续循环等工况。实验结果表明, 利用“相变蓄热原理”降低钻井液循环温度具备可行性。

将 1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>相变材料的钻井液降温性能实验结果进行对比, 结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 3 种相变材料都能够降低钻井液循环温度, 但相同加量条件下的钻井液降温效果相差较大; 以钻井液降温 10 ℃ 为评价标准, 1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>相变材料最优加量分别为

15%, 6% 和 12%。这主要是由于相变材料的钻井液降温效果受相变潜热影响显著, 2<sup>#</sup>相变材料的相变潜热最大, 其钻井液降温性能最优。

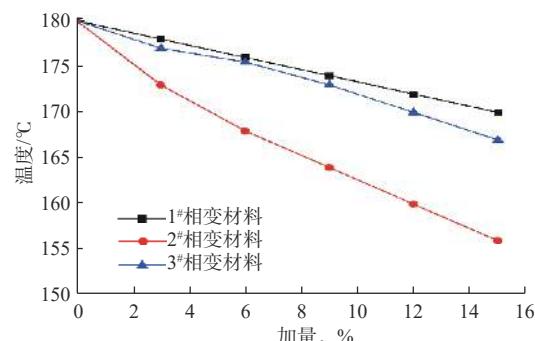


图 4 1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>相变材料的钻井液降温性能实验结果对比

Fig.4 Comparison on experimental results of drilling fluid cooling performance of phase change materials 1<sup>#</sup>—3<sup>#</sup>

## 4 结论与建议

1) 基于“相变蓄热原理”，在钻井液中添加相变材料，可以降低井筒钻井液循环温度；且相变材料的相变潜热越大，钻井液降温效果越明显。

2) 建议后续开展钻井液降温专用相变材料研发与考虑“相变蓄热”的井筒温度场数值模拟研究，为深井高温钻井液降温新技术研究奠定基础。

### 参 考 文 献

### References

- [1] 丁士东,赵向阳.中国石化重点探区钻井完井技术新进展与发展建议[J].石油钻探技术,2020,48(4):11–20.  
DING Shidong, ZHAO Xiangyang. New progress and development suggestions for drilling and completion technologies in Sinopec key exploration areas[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(4): 11–20.
- [2] 徐春春,邹伟宏,杨跃明,等.中国陆上深层油气资源勘探开发现状及展望[J].天然气地球科学,2017,28(8):1139–1153.  
XU Chunchun, ZOU Weihong, YANG Yueming, et al. Status and prospects of exploration and exploitation of the deep oil & gas resources onshore China[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(8): 1139–1153.
- [3] 石昕,戴金星,赵文智.深层油气藏勘探前景分析[J].中国石油勘探,2005,10(1):1–10.  
SHI Xin, DAI Jinxing, ZHAO Wenzhi. Analysis of deep oil and gas reservoirs exploration prospect[J]. China Petroleum Exploration, 2005, 10(1): 1–10.
- [4] 闫光庆,张金成.中国石化超深井钻井技术现状与发展建议[J].石油钻探技术,2013,41(2):1–6.  
YAN Guangqing, ZHANG Jincheng. Status and proposal of the Sinopec ultra-deep drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(2): 1–6.
- [5] 孙金声,黄贤斌,吕开河,等.提高水基钻井液高温稳定性的方法、技术现状与研究进展[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(5):73–81.  
SUN Jinsheng, HUANG Xianbin, LYU Kaihe, et al. Methods, technical progress and research advance of improving high-temperature stability of water based drilling fluids[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(5): 73–81.
- [6] 刘清友,湛精华,黄云,等.深井、超深井高温高压井下工具研究[J].天然气工业,2005,25(10):73–75.  
LIU Qingyou, ZHAN Jinghua, HUANG Yun, et al. Study on high temperature and pressure down-hole tools of deep and super-deep wells[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(10): 73–75.
- [7] 杨晓峰.抗高温 sureshot MWD 在兴古 7 块的应用 [J].石油钻探技术,2012,40(1):119–122.  
YANG Xiaofeng. Application of high temperature resisting sureshot-MWD in Xinggu 7 Block[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(1): 119–122.
- [8] 陈作,许国庆,蒋漫旗.国内外干热岩压裂技术现状及发展建议[J].石油钻探技术,2019,47(6):1–8.  
CHEN Zuo, XU Guoqing, JIANG Manqi. The current status and development recommendations for dry hot rock fracturing technologies at home and abroad[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(6): 1–8.
- [9] 马青芳.钻井液冷却技术及装备综述 [J].石油机械,2016,44(10):42–46.  
MA Qingfang. Discussion on drilling fluid cooling technology and equipment[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(10): 42–46.
- [10] MAURY V, GUENOT A. Practical advantages of mud cooling systems for drilling[J]. SPE Drilling & Completion, 1995, 10(1): 42–48.
- [11] 赵江鹏,孙友宏,郭威.钻井泥浆冷却技术发展现状与新型泥浆冷却系统的研究 [J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(9):1–5.  
ZHAO Jiangpeng, SUN Youhong, GUO Wei. Current situation of drilling mud cooling technology and research on a new type of drilling mud cooling system[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(9): 1–5.
- [12] SALGADO SANCHEZ P, EZQUERRO J M, Porter J, et al. Effect of thermo-capillary convection on the melting of phase change materials in microgravity: experiments and simulations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 154: 119717.
- [13] 宋建建,许明标,王晓亮,等.新型相变材料对低热水泥浆性能的影响 [J].钻井液与完井液,2019,36(2):218–223.  
SONG Jianjian, XU Mingbiao, WANG Xiaoliang, et al. The effects of a new phase change material on the properties of low heat cement slurries[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019, 36(2): 218–223.
- [14] MIAO Chunyan, LU Gang, YAO Youwei, et al. Preparation of shape-stabilized phase change materials as temperature-adjusting powder[J]. Frontiers of Materials Science in China, 2007, 1(3): 284–287.
- [15] 孙茹茹,李化建,黄法礼,等.相变材料在水泥基材料中的应用 [J].硅酸盐通报,2020,39(3):662–668,676.  
SUN Ruru, LI Huajian, HUANG Fali, et al. Application of phase change materials in cement-based materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(3): 662–668, 676.

[编辑 滕春鸣]