

# HTD-3型高温堵漏材料研制及性能评价

蒋炳, 严君凤, 张统得

(中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川成都 611734)

**摘要:** 深海钻探往往伴随着高温、高压, 对钻井用堵漏材料提出了新的要求。首先通过对颗粒状、纤维状和片状堵漏材料的耐高温筛选, 制作了HTD-3型高温堵漏材料。然后使用DL-3A型高温堵漏评价仪器对该堵漏材料的抗温、承压和封堵性能进行了测试, 利用SEM电镜扫描对堵漏材料架桥情况进行了观察和分析, 最后以5%梯度浓度进行了配伍性实验。测试结果表明, HTD-3型高温堵漏材料除对钻井液密度影响稍大外, 对钻井液其他基本性能影响较小, 在该材料中, 不同级配的颗粒状材料完成了架桥, 纤维状和片状材料完成了充填, 形成了强度较高的封堵墙。通过实验证明: HTD-3型高温堵漏材料不仅有着较好的抗温、承压能力, 还有较好的封堵效果。HTD-3型高温堵漏材料的研制为未来深海钻探堵漏提供了一种可行的选择。

**关键词:** 深海钻探; 高温高压; 堵漏材料; 钻井液性能; 封堵墙

**中图分类号:** P634.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2022)01-0057-07

## Development and performance evaluation of HTD-3 high temperature plugging material

JIANG Bing, YAN Junfeng, ZHANG Tongde

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

**Abstract:** Deep sea drilling is often accompanied by high temperature and high pressure, which puts forward new requirements for plugging materials for drilling. The HTD-3 high temperature plugging material was produced through the high temperature resistance screening of granular, fibrous and flaky leakage plugging materials. Then, the DL-3A high temperature plugging evaluation instrument was used to test the temperature resistance, pressure bearing and plugging performance of the plugging material. SEM was used to observe and analyze the bridging condition of the plugging material. Finally, the compatibility test was carried out at 5% gradient concentration. The results show that the HTD-3 high-temperature plugging material has some impact on drilling fluid density, but has little impact on other basic properties of drilling fluid. In this material, granular materials with different sizes completed bridging, fibrous and flaky materials completed filling, forming a high-strength plugging wall. HTD-3 high-temperature plugging material not only has a good temperature bearing and pressure bearing capacity, but also has a good sealing performance with plugging effect. The development of HTD-3 high temperature plugging material provides a feasible choice for deep-sea drilling plugging in the future.

**Key words:** deep sea drilling; high temperature and high pressure; plugging materials; drilling fluid performance; plugging wall

## 0 引言

随着人类对地球资源的不断探索和开发利用,

深海海底和地球内部的探索和开发的重要性更加突出。当前的国际大洋发现计划(IODP)是地球科

**收稿日期:** 2021-08-31; **修回日期:** 2022-01-10 **DOI:** 10.12143/j.ztgc.2022.01.008

**基金项目:** 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)

**第一作者:** 蒋炳, 男, 汉族, 1995年生, 硕士研究生, 地质工程专业, 主要从事钻井液及岩土钻掘技术研究工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, 455671041@qq.com。

**引用格式:** 蒋炳, 严君凤, 张统得. HTD-3型高温堵漏材料研制及性能评价[J]. 钻探工程, 2022, 49(1): 57-63.

JIANG Bing, YAN Junfeng, ZHANG Tongde. Development and performance evaluation of HTD-3 high temperature plugging material[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1): 57-63.

学领域迄今规模最大、影响最深的国际大科学计划,我国“十三五”国家科技创新规划中,将“深海、深地、深空、深蓝科学研究”列为战略前瞻性重大科学问题<sup>[1-2]</sup>。在深海钻探过程中,作业环境和条件较陆上更加复杂。由于高压层段无法准确预测,极有可能导致井身设计不合理,难免会发生各种井下事故,井涌、井漏等情况极易发生。如果是浅部地层井漏,一般会使用海水顶漏钻进快速通过,下套管,或者用水泥封固;如果是因为裂缝、溶洞等原因引起的,可以使用堵漏剂堵漏;如果是钻井工程因素导致的漏失,一般通过操作工艺来解决,如严格控制在裸眼段的起下钻速度、降低钻井液排量、调节钻井液性能等;若压井、试压堵漏或加重钻井液过程中发生压裂性漏失,被压漏的地层一般不能恢复原来的承压能力,需下套管封隔<sup>[3]</sup>。

为了合理解决高地温条件下的井漏,需对高温堵漏材料进行较为系统的研究,以便对未来深海钻探施工中出现的井漏问题进行合理的处理,保证施工效率,节约钻探施工成本。

目前国内外相关研究机构和人员对堵漏新材料进行了探索,取得了较好的研究成果。现有的堵漏材料按机理和功能主要分为以核桃壳、棉纤维、云母片为代表的桥接堵漏材料,以DTR为代表的高失水堵漏材料,以DF-1为代表的暂堵材料,化学堵漏材料,无机胶凝堵漏材料,软硬塞堵漏材料,以云母片、蛭石、贝壳等为代表的高温堵漏材料以及复合堵漏材料<sup>[4-7]</sup>。目前针对高温堵漏材料的研究主要还是以桥接堵漏为主,所谓桥接堵漏,是指将不同形状(颗粒状、纤维状、片状)和不同尺寸(粗、中、细)的惰性材料以不同的配方混合于钻井液中,直接注入漏层的一种堵漏方法,在材料注入到漏层后,形成具有一定机械强度的封堵墙,并且与漏失通道具有一定的粘结强度。在高温条件下,部分桥接堵漏材料存在高温老化失效现象,容易导致封堵层破坏<sup>[8]</sup>。高温桥接堵漏主要要求高温堵漏材料在耐受高温的同时颗粒状材料所形成骨架强度达到一定要求,且片状材料能对骨架孔隙进行补充,形成堵漏墙,纤维状材料能有效增强堵漏墙抗压强度。美国的M-I Drilling Fluids L.L.C公司研制了高温随钻堵漏材料M-I-X2;在国内Fenglan Zhao等研制出了抗温性能达到140℃的适用于高温高盐油藏的新型堵漏粒子<sup>[9]</sup>;胡子乔等<sup>[10]</sup>研制出了可抗180℃高温的新型

二次交联凝胶堵漏材料;詹阳俊等<sup>[11]</sup>在井下温度81.7~87.7℃的SX2井二叠系地层中应用了其研制的高强度耐高温化学固结堵漏剂HDL-1;暴丹等<sup>[12]</sup>优选出抗220℃高温的细微填充颗粒、弹性变形颗粒和片状堵塞颗粒,基于耐高温分子和无机矿物材料,制作了抗高温高强度低密度的刚性架桥颗粒、抗高温高强度纤维类2种新型堵漏材料,取得了较好的堵漏效果;罗鸣等<sup>[13]</sup>使用抗高温弹性堵漏剂FLEX配合刚性堵漏剂BLN和承压堵漏剂STRH,成功堵漏位于南海西部的高温钻井,承压能力达到20 MPa;苏晓明等<sup>[14]</sup>制作了新型复合堵漏材料SXM-I,静态承压可达9 MPa,在碳酸盐岩缝洞型异常高温高压储集层中表现出较好的封堵性能。

目前针对深海高温高压钻探中的堵漏研究较少,且已有的堵漏材料不能同时满足深海钻探堵漏所要求的耐温性能(260℃以上)和承压性能(10 MPa以上),本文以桥接堵漏材料为基础,以承受高温高压为目标,研制了HTD系列高温堵漏材料,为将来深海钻探堵漏施工提供了可行的选择。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验仪器与测试方法

材料实验材料包括3大类,分别为颗粒状堵漏材料,纤维状堵漏材料和片状堵漏材料。

实验设备主要为GW-30型滚子加热炉(图1)和DL-3A型高温高压堵漏评价仪器(图2)。



图1 GW-30型滚子加热炉

Fig.1 GW-30 roller furnace

GW-30型滚子炉主要参数:电源电压220 V±10%,频率50 Hz;使用温度范围50~300℃;泥浆流速0.16 m/s;陈化釜转速50 r/min;加热功率1500 W;电机功率370 W;鼓风电机25 W;外形尺寸93



图2 DL-3A型高温高压堵漏评价仪器

Fig.2 DL-3A high temperature and high pressure plugging evaluation instrument

cm×60 cm×80 cm;质量 130 kg。

DL-3A型高温高压堵漏评价仪器主要参数:工作压力 0~40 MPa;工作温度为室温~300 °C;返排压力 0~40 MPa;堵漏液用量 2 L;缝板规格 1~5 mm 缝板;孔板规格为 1~5 mm 圆孔板;功率 5 kW;电源为交流电压 380 V。

## 1.2 实验方法

初筛各堵漏材料,选取了以SRD为代表的8种颗粒状材料,以NST为代表的7种纤维状材料和以云母片为代表的4种片状堵漏材料放入基浆中进行高温热滚老化,热滚老化时间为16 h,温度为260 °C,待冷却后观察各材料在热滚前后的变化情况,了解高温对各个材料的表现及性能影响。后通过材料复配,制作HTD-3型高温堵漏材料,使用DL-3A型高温高压堵漏评价仪器,将堵漏材料与基浆混合后加入至测试容器中,共3 L,在加压容器中加入3 L基浆,升温至260 °C后通过注水泵加压,由0逐渐加压至10 MPa以上,每加压0.5 MPa后持续10 min以上,在加压至10 MPa时需持续超过30 min。根据漏失量大小了解HTD-3型高温堵漏材料的承温、承压以及封堵性能,运用SEM电镜扫描对HTD-3型高温堵漏材料架桥后情况进行微观分析,最后通过配伍性实验对HTD-3型高温堵漏材料做出性能评价。

## 2 HTD高温堵漏材料的研制

### 2.1 堵漏材料初筛

#### 2.1.1 颗粒状材料

根据“三分之一”架桥规则,另根据漏失程度,判

断漏失通道特征,合理选择堵漏材料颗粒大小、级配、形状、性质等。架桥颗粒尺寸一般为 $0.65D_{\text{裂缝}} < D_{\text{堵漏材料}} < D_{\text{裂缝}}$ 。将颗粒状材料控制在10~40目,并保持一定级配,纤维状材料控制在1~6 mm,片状材料控制在10~20目。

经滚子加热炉初筛的颗粒状材料,在热滚前后几乎无变化,如SRD,表面见些许泛黄,但颗粒大小保持不变,不出现因高温而膨胀现象,其余初筛的颗粒状材料见表1。

表1 颗粒状材料热滚前后性状对比

Table 1 Comparison of the properties of granular materials before and after hot rolling

材 料	颜 色	性状表现
硅藻土	颜色稍浅	不变
陶粒	不变	不变
石榴子石	不变	不变
弹性石墨	颜色变深	不变
核桃壳	颜色变深	强度降低,手指可碾碎
FRD	不变	不变
SRD	不变	不变
废旧橡胶颗粒	不变	软化,且附着于釜壁

#### 2.1.2 纤维状材料

经滚子加热炉初筛的纤维状材料,大部分材料颜色变深,强度依旧较高,且耐水耐热,但其中也出现了性能变化较大的纤维状材料,如聚丙烯纤维在高温条件下融化,耐热性差,而锯末在加热后变色,手指可轻松碾碎,强度降低。纤维状材料具体表现见表2。

#### 2.1.3 片状堵漏材料

经滚子加热炉初筛的片状材料,如云母片,除颜

表2 纤维状材料热滚前后性状对比

Table 2 Comparison of the properties of fibrous materials before and after hot rolling

材 料	颜 色	性状表现
锯末	略有变色	强度较低
甘蔗渣	烧焦,呈焦黑色	手指可碾碎
石棉纤维	变深	不变
玻璃纤维	变黄	不变
NST	变深	不变
聚丙烯纤维	不变	融化后常温下重塑
陶瓷纤维	几乎不变	不变



色稍深,强度、塑性、硬度、韧性等性能不变,其余片状材料具体表现见表3。

表3 片状材料热滚前后性状对比

Table 3 Comparison of the properties of flaky materials before and after hot rolling

材 料	颜 色	性状表现
云母片	略微变深	不变
稻壳	烧焦,呈焦黑色	手指可碾碎
生蛭石	几乎不变	不变
熟蛭石	几乎不变	不变

## 2.2 HTD-3型高温堵漏材料性能评价

经过对堵漏材料的初筛,其中颗粒状材料除核桃壳外,其余材料在高温热滚后均有适当的几何尺寸和机械性能,同时具有一定的抗压、抗张和抗剪强度;纤维状材料在热滚后,除聚丙烯纤维、锯末、甘蔗渣外,其余材料均可承受高温,考虑到纤维状材料还需拥有足够好的弹性和塑性,主要选择了石棉纤维和NST;对于片状材料,稻壳在高温状态下烧焦、变脆,资料表明生蛭石在300℃高温状态下,膨胀体积可达10~20倍<sup>[15]</sup>,可能导致堵漏材料级配发生改变,不能填满颗粒状材料中的间隙,进而改变堵漏材料的承压能力,故主要选择了云母片和熟蛭石作为堵漏材料中的片状材料。通过对3种材料的筛选,结合“三分之一”架桥理论、理想充填理论和D90规则<sup>[16-18]</sup>,确定颗粒状材料的粒径控制在10~120目,并保持一定级配,纤维状材料长度1~6 mm,片状材料10~20目。确定材料配方为47%的颗粒状材料,11.5%的纤维状材料,8%的片状材料,以及悬浮材料和填充材料复配出高温堵漏材料HTD-3,见图3。

### 2.2.1 封堵性能

#### 2.2.1.1 单体材料

对单体材料用2~4 mm的圆孔板在260℃高温下进行封堵性能测试,测试范围为5%~20%。其中颗粒状材料选择了SRD,纤维状材料选择了NST,片状材料选择了云母片,具体结果见表4。其中SRD为矿物类堵漏材料,主要成分为CaCO<sub>3</sub>,NST主要成分为氧化铝,云母片主要成分为多硅白云母、石英、石榴子石和金红石。上述3种材料均为环境友好型材料,对海洋环境无污染。材料封堵性



图3 HTD-3型高温堵漏材料

Fig.3 HTD-3 high temperature plugging material

能的测试均采用5 mm孔板,所筛选材料尺寸 $\geq 1/3$ 孔板尺寸。

表4 单体材料堵漏结果

Table 4 Plugging results of single material

材 料	加量/%	堵漏结果
SRD	5	常压,全漏失
	10	承压1 MPa,漏失10.1 g
	15	承压1 MPa,漏失2.1 g
	20	承压2 MPa,漏失11.5 g
NST	5	常压,全漏失
	10	常压,全漏失
	15	常压,全漏失
	20	常压,全漏失
云母片	5	常压,全漏失
	10	常压,全漏失
	15	承压1 MPa,漏失25.1 g
	20	承压1 MPa,漏失20.5 g

由表4可见颗粒状材料在加量达到20%时能承受最大2 MPa压力,但继续加压后击穿,纤维状材料单独使用时在常压下全漏失,片状材料最高承压1 MPa,继续加压后击穿。总体来看,能承受高温的单体材料并不能承受高压,相对堵漏目标所要求的10 MPa差距较大。故需要对材料进行复配,以满足承压要求。

#### 2.2.1.2 复配材料

通过DL-3A型高温堵漏评价仪器对HTD-3型堵漏材料的堵漏性能进行的评价见图4~6。

由图4~6可见,在实验温度达到260℃后,通过注水泵对缸体加压,封堵压力上升至10 MPa,最终漏失量控制在了5.88 mL,漏失量较小,堵漏成功,

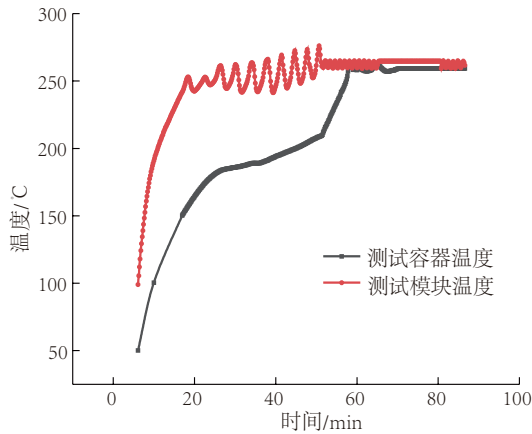


图 4 10% HTD-3 堵漏材料实验中温度曲线  
 Fig.4 Temperature curve of 10% HTD-3 plugging material test

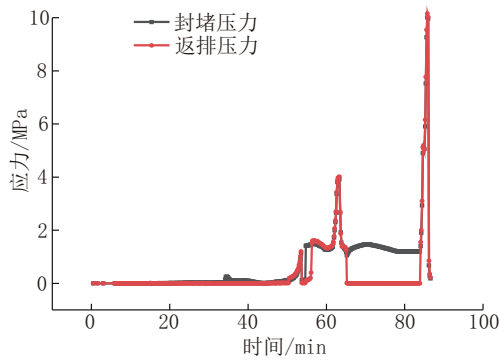


图 5 10% HTD-3 堵漏材料实验中压力曲线  
 Fig.5 Pressure curve of 10% HTD-3 plugging material test

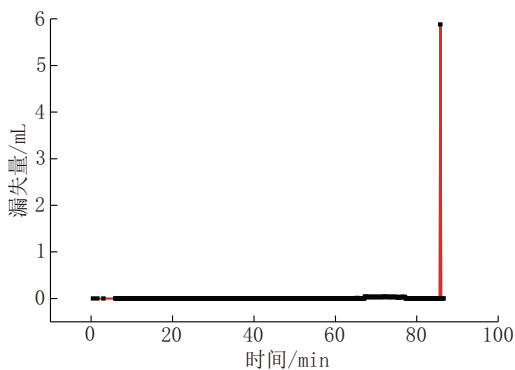
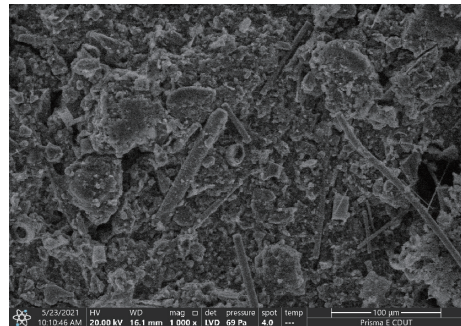


图 6 10% HTD-3 堵漏材料实验中漏失量曲线  
 Fig.6 Leakage curve of 10% HTD-3 plugging material test

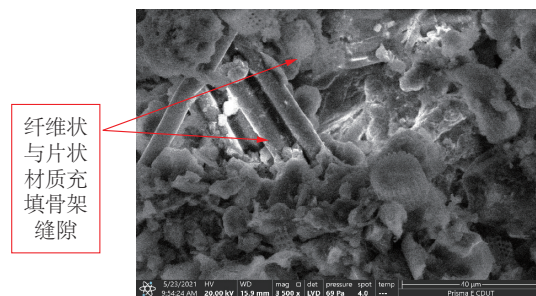
说明 HTD-3 型高温堵漏材料不仅能耐受 260 °C 的高温,同时在高压力条件下保证了较好的架桥结构强度。

### 2.2.2 架桥效果

将堵漏材料与基浆形成的滤饼烘干后进行电镜扫描实验,根据电镜扫描结果,HTD-3 型高温堵漏材料加入到钻井液中,在压力作用下,形成了致密的封堵墙,见图 7(a),而其中颗粒状材料较好地完成了架桥,而纤维状材料和片状材料完成了缝隙充填,加固了骨架强度,见图 7(b)。



(a) 封堵墙正面



(b) 封堵墙剖面

图 7 封堵墙电镜扫描观测结果

Fig.7 Observation results of the sealing wall by SEM

### 2.2.3 配伍性

为了解高温堵漏材料的配伍性,选择了从青海共和干热岩 GH-2 井取出的高温泥浆,在其中以 5% 为梯度,加入了 5%~25% 的 HTD-3 型高温堵漏材料,以了解 HTD-3 型高温堵漏材料对钻井液的性能影响,见图 8~11。

综合图 8~11 来看,HTD-3 型高温堵漏材料加入到 GH-2 井高温钻井液之后,在加量 5% 时密度为 1.10 g/cm<sup>3</sup>,而后密度逐渐上升,至加量 25% 时钻井液密度为 1.15 g/cm<sup>3</sup>;滤失量基本保持稳定,都保持在 7.4~8 mL 区间。粘度方面,塑性粘度和表观粘度均有较小程度的上升,随着堵漏材料的增加,塑性粘度由 0% 加量时的 34 mPa·s 上升至 25% 加量时的 36.5 mPa·s,表观粘度由 0% 加量时的 47.75

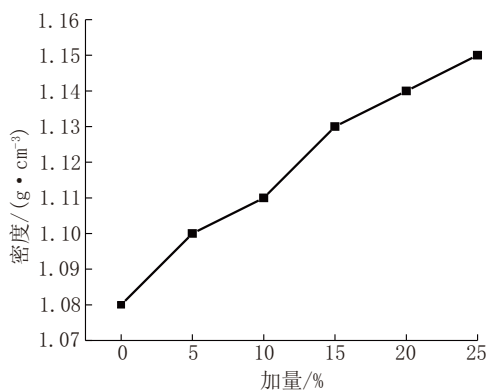


图8 HTD-3堵漏材料加入后钻井液密度

Fig.8 Drilling fluid density after adding HTD-3 plugging material

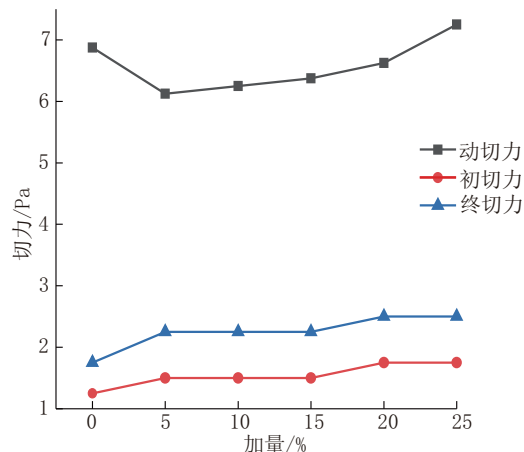


图11 HTD-3堵漏材料加入后钻井液切力

Fig.11 Drilling fluid shear force after adding HTD-3 plugging material

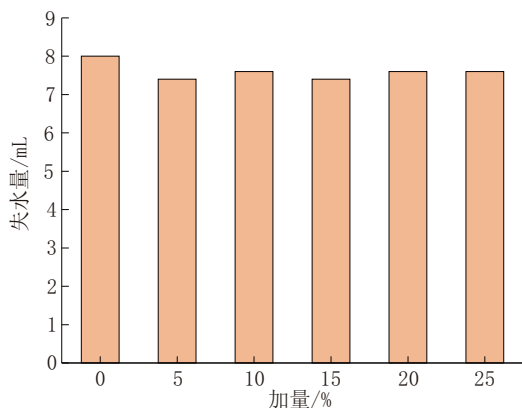


图9 HTD-3堵漏材料加入后钻井液滤失量

Fig.9 Leakage of drilling fluid after adding HTD-3 plugging material

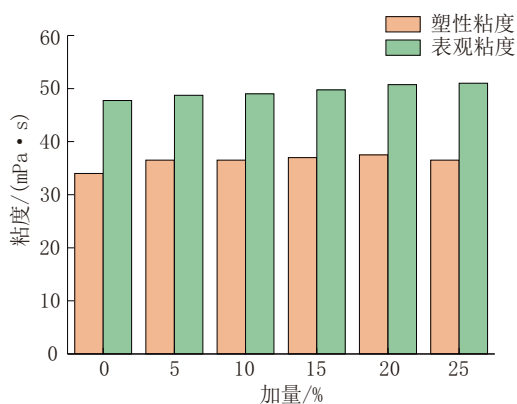


图10 HTD-3堵漏材料加入后钻井液塑性粘度和表观粘度

Fig.10 Plastic viscosity and apparent viscosity of drilling fluid after adding HTD-3 plugging material

mPa·s 上升至 25% 加量时的 51 mPa·s。切力方面, 动切力也有所提高, 由 0% 加量时的 6.875 Pa 上升至 25% 加量时的 7.250 Pa, 静切力中的初切由 1.25

Pa 上升至 1.75 Pa, 终切由 1.75 Pa 上升至 2.5 Pa。总的来说, HTD-3 型高温堵漏材料除密度变高之外, 对其他方面, 包括滤失量、粘度和切力, 均无较大影响。

HTD-3 型高温堵漏材料为复配材料, 制作过程中所选的基础单体材料均为惰性材料, 对海洋环境友好且无污染, 可在深海钻探中进行实际试验性使用, 可在现场根据实际情况继续进行配方调整, 以完成高温堵漏材料的野外试验。

### 3 结论

(1) 通过初筛后的材料, 在颗粒状和纤维状材料中, 植物类、聚合物类材料无法承受 260℃ 的高温, 矿物质材料抗温能力更强。经筛选后研制的 HTD-3 型高温堵漏材料具有较好的耐温、承压能力, 具有较好的封堵效果。

(2) 经过 SEM 观察, 不同级配的颗粒状材料在封堵墙中完成了架桥, 而纤维状材料和片状材料也完成了对桥中缝隙的充填, 3 种材料互相配合, 形成了致密的封堵墙, 达到了封堵的目的。

(3) HTD-3 型高温堵漏材料在与钻井液的配伍性实验中表明, 该堵漏材料对高温钻井液的基础性能(除密度外)均无较大影响。

(4) HTD-3 型高温堵漏材料对海洋环境友好且无污染, 可在深海钻探施工中应用。

## 参考文献(References):

- [1] 叶建良,张伟,谢文卫.我国实施大洋钻探工程的初步设想[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(2):1-8.  
YE Jianliang, ZHANG Wei, XIE Wenwei. Preliminary thoughts on implementation of the ocean drilling project in China [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(2):1-8.
- [2] 翦知湔.进军深海科学前沿——我国参与大洋钻探的进展[J].科学通报,2018,63(36):3877-3882.  
JIAN Zhimin. Towards the scientific frontier of deep-sea research—Progress of China's participation in ocean drilling[J]. Chinese Science Bulletin, 2018,63(36):3877-3882.
- [3] 史吉辉.南海D-13高温高压井井漏分析及处理工艺[J].中国石油和化工标准与质量,2017,37(15):148-149,151.  
SHI Jihui. Lost circulation analysis and treatment technology of Nanhai D-13 high temperature and high pressure well[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2017, 37(15): 148-149,151.
- [4] 王胜,吴丽钰,蒋贵,等.深孔纳米复合水泥基护壁堵漏材料研究[J].钻探工程,2021,48(12):7-13.  
WANG Sheng, WU Liyu, JIANG Gui, et al. Nano composite cement based wellbore protection and plugging materials for deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2021,48(12):7-13.
- [5] 张洪利,郭艳,王志龙.国内钻井堵漏材料现状[J].特种油气藏,2004,11(2):1-2,10.  
ZHANG Hongli, GUO Yan, WANG Zhilong. Current situation of drilling plugging materials in China[J]. Special & Gas Reservoirs, 2004,11(2):1-2,10.
- [6] 熊正强,陶士先,蒋睿,等.抗高温随钻封堵材料研究进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(12):33-36.  
XIONG Zhengqiang, TAO Shixian, JIANG Rui, et al. Research progress of high temperature resistant loss circulation material while drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(12):33-36.
- [7] 田陆飞,王崎,刘振,等.钻井用堵漏材料研究进展[J].中国建筑防水,2010(6):1-4.  
TIAN Lufei, WANG Qi, LIU Zhen, et al. Progress in research on leak stopping materials in drilling [J]. China Building Waterproofing, 2010(6):1-4.
- [8] 康毅力,王凯成,许成元,等.深井超深井钻井堵漏材料高温老化性能评价[J].石油学报,2019,40(2):215-223.  
KANG Yili, WANG Kaicheng, XU Chengyuan, et al. High-temperature aging property evaluation of lost circulation materials in deep and ultra-deep well drilling [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019,40(2):215-223.
- [9] Fenglan Zhao, Zihao Li, Jieheng Wu. New type plugging particle system with high temperature & high salinity resistance [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 152: 317-319.
- [10] 胡子乔,刘四海,张金成,等.新型抗高温二次交联凝胶堵漏材料的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(7):103-106.  
HU Ziqiao, LIU Sihai, ZHANG Jincheng, et al. Development of a novel two-step crosslinking Gel with high temperature resistance for plugging lost circulation [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(7):103-106.
- [11] 詹俊阳,刘四海.高强度耐高温化学固结堵漏剂HDL-1的研制及应用[J].石油钻探技术,2014,42(2):9-74.  
ZHAN Junyang, LIU Sihai. Development and application of chemical consolidation plugging agent HDL-1 [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014,42(2):9-74.
- [12] 暴丹,邱正松,邱维清,等.高温地层钻井堵漏材料特性实验[J].石油学报,2019,40(7):846-857.  
BAO Dan, QIU Zhengsong, QIU Weiqing, et al. Experiment on properties of lost circulation materials in high temperature formation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019,40(7):846-857.
- [13] 罗鸣,韩成,陈浩东,等.南海西部高温高压井堵漏技术[J].石油钻采工艺,2016,38(6):801-804.  
LUO Ming, HAN Cheng, CHEN Haodong, et al. Plugging technology for HTHP wells in western South China Sea [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016,38(6):801-804.
- [14] 苏晓明,练章华,方俊伟,等.适用于塔中区块碳酸盐岩缝洞型异常高温高压储集层的钻井液承压堵漏材料[J].石油勘探与开发,2019,46(1):165-172.  
SU Xiaoming, LIAN Zhanghua, FANG Junwei, et al. Lost circulation material for abnormally high temperature and pressure fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tazhong block, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019,46(1):165-172.
- [15] 董洪栋.松科2井抗高温随钻堵漏材料优选及封堵效果评价[D].成都:成都理工大学,2017.  
DONG Hongdong. Selection of high temperature resistant plugging material and its plugging effect evaluation for SK2 [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [16] Abrams A. Mud design to minimize rock impairment due to particle invasion [J]. JPT, 1977,29(3):586-593.
- [17] Kaeuffer M. Determination de L' Optimum de remplissage granulometrique et quelques proprietes S' y rattachant [C]. Rouen: Congress International de l' A. F. T. P. V., 1973.
- [18] Hands N, Kewbel K, Maikranz S. Drilling fluid reduces formation damage, increases production rates [J]. Oil & Gas J, 1998, 96(28):65-68.

(编辑 李艺)