

# 川西海相破碎地层防塌钻井液技术研究及应用

王方博

(中石化西南石油工程有限公司钻井工程研究院,四川 德阳 618000)

**摘要:**川西海相破碎地层的复杂情况制约了川西海相气田开发的进程,且目前针对海相灰岩及白云岩为主的破碎地层的垮塌没有相关论述或研究,为此开展针对川西海相雷口坡组破碎地层的防塌钻井液体系技术研究就非常重要。本文从川西雷口坡组海相地层特性研究出发,在原有抗温防塌钻井液体系配方优化的基础上,引入成膜剂,形成了川西海相破碎地层防塌钻井液体系技术,并对该体系各项性能进行了评价,在现场应用中取得了良好的效果。

**关键词:**川西海相气田;破碎地层;雷口坡组;成膜剂;防塌钻井液体系

**中图分类号:**TE254;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)09-0055-10

## Application of anti-collapse drilling fluid technology in marine broken formation in western Sichuan

WANG Fangbo

(Drilling Engineering Research Institute of Sinopec Southwest Petroleum Engineering Co., Ltd.,

Deyang Sichuan 618000, China)

**Abstract:** The complexity of marine broken formation in western Sichuan limits the oil and gas development progress in the western Sichuan, and there is no relevant discussion or research on well collapse in the marine broken formation mainly composed of limestone and dolomite; therefore, it is very necessary to carry out research on the anti-collapse drilling fluid system for the marine broken formation in the Leikoupo formation in western Sichuan. Based on the study of the characteristics of the Leikoupo marine formation in western Sichuan, the film forming agent is added to the existing formula of the temperature-resistant and anti-collapse drilling fluid system to form the anti-collapse drilling fluid system technology for the marine broken formation in western Sichuan. The performance of the system is evaluated with good results obtained in field application.

**Key words:** western Sichuan marine gas field; broken formation; Leikoupo formation; film-forming agent; anti-collapse drilling fluid system

## 0 引言

川西海相气田主体区块在彭州市境内,地理上处于四川省成都市彭州、都江堰市境内,东南距成都市约45 km,主要涉及乡镇包括丽春镇、隆丰镇、葛仙山镇等。构造位置处于龙门山中段前缘由关口断裂与彭县断裂夹持的“石羊-金马-鸭子河”构造带上,属于龙门山大型构造带中段的山前隐伏构

造带,西面紧邻龙门山前缘,东部、南部紧邻“元通-安德”凹陷,北部为绵竹凹陷。此构造带共发育6个局部构造:白鹿场、鸭子河、金马、聚源、石羊场、石板滩、大邑等。其中“金马-鸭子河”构造南缓北陡,总体上呈北东走向。川西气田雷口坡组重点潜力区含气面积为152 km<sup>2</sup>,估算储量1056亿 m<sup>3</sup>,其中雷四上亚段上储层地质储量282亿 m<sup>3</sup>,下储层地质储

收稿日期:2020-10-15; 修回日期:2021-01-25 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.09.006

基金项目:中石化石油工程公司科技项目“龙门山海相超深井优快钻井集成配套技术研究”(编号:SG15-08K)

作者简介:王方博,男,汉族,1971年生,主任师,高级工程师,油田化学专业,主要从事钻井液技术与现场推广应用工作,四川省德阳市金沙江西路699号钻井工程研究院803室,497051903@qq.com。

引用格式:王方博.川西海相破碎地层防塌钻井液技术研究及应用[J].钻探工程,2021,48(9):55-64.

WANG Fangbo. Application of anti-collapse drilling fluid technology in marine broken formation in western Sichuan[J]. Drilling Engineering, 2021,48(9):55-64.

量774亿 $m^3$ 。

川西海相深井主要以雷四油气为主要目的层,兼探马鞍塘组油气;雷四上亚段预测发育三套储层,其中第一、二套储层最为发育。雷四段储层岩性虽然为灰岩或白云岩,但地层破碎,极易垮塌掉块,造成卡钻事故,前期6口直井因地层破碎卡钻12次,严重制约了开发的进程。根据目前川西海相开发方案,共部署6个平台29口井,每个平台4~6口井,井身结构由前期的四开制直井变更为三开制大斜度定向井/水平井。二开进入雷口坡组顶5m完钻,三开用 $\varnothing 165.1$  mm钻头专打雷口坡组目的层,井斜从50余度增斜到80余度,段长600余米到700余米。29口井平均井深6964 m,平均井斜 $83.3^\circ$ ,其中大于 $86^\circ$ 的井5口。三开直井坍塌压力梯度在1.00~1.25 MPa/100 m,大斜度定向井/水平井坍塌压力梯度1.23~1.38 MPa/100 m。在三开小井眼破碎地层增斜钻进,同比直井卡钻风险更高,一旦发生复杂情况,处理难度大,而且针对海相地层破碎性垮塌没有相关论述或针对性的研究,故研究应对海相破碎地层垮塌的防塌钻井液体系就相当必要。

## 1 川西海相雷口坡组破碎地层井壁失稳机理研究

### 1.1 岩性基本特征

雷口坡组以白云岩及灰岩为主,地层破碎、节理发育。对测井资料分析及对实钻地层岩心测试,该地层岩心裂缝比较发育,部分井取心率较低,以水平缝为主,少量网状缝。对PZ1井、YS1井和YAS1井等多口井雷口坡组地层岩样进行了矿物组分分析,结果表明雷口坡组地层均为灰岩或白云岩,且岩性较纯。其中白云岩中白云石含量大都在90%以上,部分含30%~40%方解石,微含硬石膏和天青石。灰岩中方解石含量大都在85%以上,部分含10%左右白云石,微含石英、长石。岩心矿物组分以白云岩和方解石为主,几乎不含粘土矿物。岩心经蒸馏水浸泡,岩石裂缝及孔隙胶结物有可溶性矿物硬石膏等溶蚀,岩屑滚动回收率达98.6%。

### 1.2 岩心物性特征

PZ1井测井解释储层发育段平均孔隙度4%,累厚85 m,井段5810~5828 m(产层段上部),全直径实验孔隙度1.22%~14.38%,平均4.22%,渗透率均值0.22 mD,地层渗透性强,钻井液滤液易进入孔缝,如果钻井液封堵性不好,在压力传递的作用下,

则会加剧滤液进入地层,进而地层失去力学平衡,造成掉块甚至卡钻等井壁失稳技术难题。

雷口坡组以Ⅱ~Ⅲ类储层为主,储层类型主要为孔隙型。

第一储层段:测井孔隙度一般均大于4%。XS1井产层段实验平均孔隙度可达6.76%,平均渗透率达10.1 mD。

第二储层段:测井孔隙度均大于2%。其中XS1井最高达7.06%,PZ1井为4.22%。镜下统计72%的样品有孔隙发育,其中面孔率 $\geq 3\%$ 的样品占33%。

### 1.3 岩心扫描电镜分析

通过本区已钻井岩片资料分析,川西雷口坡组四段储层储集空间类型有晶间溶孔、溶缝、溶蚀扩大孔、晶间孔、裂缝和粒间溶孔等,溶孔大小0.05~2 mm,溶缝0.01~1.5 mm。由于裂缝发育,钻开雷口坡组地层时,由于钻井液液柱和地层压力的差值( $\Delta P$ )作用会使得钻井液及其滤液更多的渗入到地层内部,导致孔缝扩张,破坏地层稳定性,造成掉块甚至卡钻等复杂情况。

在平面上从XSH1井往XS1井储层次生溶孔增加、原生孔隙减少。在XS1井5712~5723 m的24个储层样品中有45.8%的样品面孔率达5%~15%,溶蚀孔、洞、缝较发育,溶蚀孔、洞多呈蜂窝状分布,部分溶洞大小达2 mm以上。

雷四上亚段3个储层段储集空间类型如下:

第一储层段以晶溶孔、溶缝和不规则溶孔为主,晶间孔次之,为裂缝-孔隙型储层;第二储层段以晶间溶孔为主,不规则溶孔和溶缝次之,为孔隙型储层;第三储层段以晶间溶孔为主,不规则溶孔和溶缝次之,为孔隙型储层。

通过PZ1井薄片资料分析,产层段上部5808~5827 m,累厚22 m储层较发育,面孔率 $\geq 3\%$ 的样品主要集中在此段。

### 1.4 断层发育情况

该区断层主要表现为北北东向及近东西向,在隆起带的两侧断裂段断层相对集中,受边界逆断层控制,断层走向以北东向为主,其次为北西向,其中彭县断裂、关口断裂、白鹿场断裂对本区油气成藏有重要影响。隆起带轴部及两翼,发育次一级的小断层,均为逆断层,以北东东、北北东、北北西、北西西走向为主,特别是金马构造、鸭子河的①号、④号高

点附近小断层较发育。该区断层呈逆断层,地层受挤压应力影响,在破岩时应力释放引起井壁坍塌,在大斜度井可能会增加该地层失稳的几率。

雷口坡组地层破碎除受地壳运动的影响外,四川汶川地震对川西地质构造的作用加剧了这一影响。这次地震引起了大区域的地表变形。通过震前及震后GPS观测图表明,龙门山和四川盆地除了在水平方向上发生大幅度的相向运动外,龙门山大幅度上升,四川盆地相对下降,下降幅度在沿龙门山前的安县、都江堰一带最大,如图1所示。

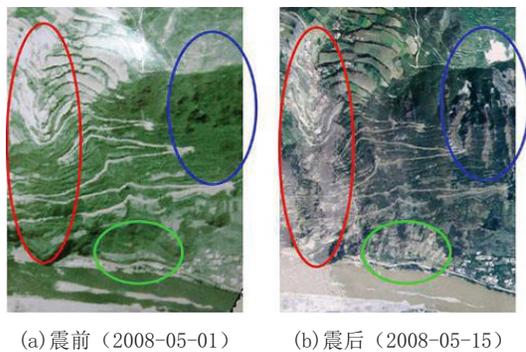


图1 汶川地震对四川盆地的影响

Fig.1 Impact of the Wenchuan earthquake on Sichuan Basin

通过在雷口坡组井段取心,其岩心除裂缝发育外,岩心破碎严重。部分井岩心情况如图2所示。由图2可知,取出的岩心破碎严重,这更进一步加剧了井壁失稳的机率。

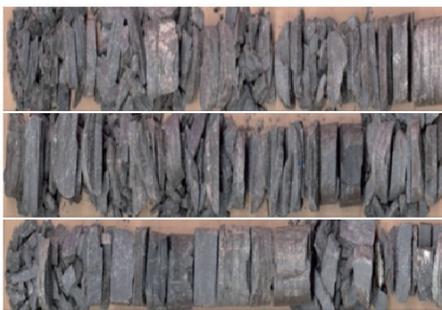


图2 雷口坡组岩心情况

Fig.2 Core condition of the Leikoupo formation

## 2 川西海相破碎地层抗高温防塌钻井液体系研究

### 2.1 破碎地层抗温防塌体系材料的研选

通过对川西海相雷口坡组地层失稳机理的分析可知,钻井液的防塌重点在以加强固壁为主的封堵防塌,故在原有配方的基础上,对常用的石蜡类封堵

剂、沥青类封堵剂进行了优选,研发了成膜剂,利用成膜剂与乳化石蜡形成膜材料与石蜡乳液双封堵<sup>[1-2]</sup>的超强成膜防塌钻井液体系。

#### 2.1.1 成膜剂CHSM-1的合成及评价

##### 2.1.1.1 成膜剂的合成

填充无机粒子以提高高分子材料的物理力学性能一直都是重要的研究方向,无机粒子纳米化为这一研究领域提供了更大的空间。近年来,CaCO<sub>3</sub>填充改性高分子材料受到广泛关注, CaCO<sub>3</sub>/APAM<sup>[3]</sup>, PS/SBS/纳米CaCO<sub>3</sub><sup>[4]</sup>, PVC/纳米CaCO<sub>3</sub><sup>[5]</sup>, PMMA/CaCO<sub>3</sub><sup>[6]</sup>, 聚甲基丙烯酸丁酯/CaCO<sub>3</sub><sup>[7]</sup>等复合材料的制备、力学性能、结晶性能、流变性能及热性能都有了较广泛的研究。

苯乙烯-马来酸酐共聚物(SMA)是一种两亲聚合物,主要有润湿、分散、乳化、增溶、起泡、消泡、保湿、润滑、洗涤、渗透、杀菌、防腐、絮凝、乳化、稳泡、增稠、成膜和粘附等功能。当苯乙烯和马来酸酐两种单体等摩尔发生聚合时,形成的是交替SMA共聚物。其中弱极性的苯乙烯和强极性的马来酸酐使其具有明显的两亲性质,不仅和疏水材料相容,而且和亲水材料相容<sup>[8-12]</sup>,因而能够和很多有机的、无机功能材料共混、杂化、包覆形成复合功能材料。两亲聚合物的亲水链段和疏水链段在表面或界面间具有一定的取向性,在各种表面或界面有很好的吸附作用,所以具有降低表面张力和界面张力的能力<sup>[13]</sup>。

利用SMA功能强大的特性,填充纳米CaCO<sub>3</sub>,进行杂化、包覆,形成功能强大的纳米材料成膜剂CHSM-1。即使用原位固相接枝法对纳米级CaCO<sub>3</sub>表面进行改性<sup>[14-16]</sup>,纳米CaCO<sub>3</sub>与苯乙烯-马来酸酐共聚物通过硅烷偶联剂接枝共聚形成有机/无机杂化共聚物CHSM-1,这可以降低两者的缺陷,又可发挥两者的优点<sup>[17]</sup>,同时,碳酸钙粉体表面接枝多条分子链,使其有类似树枝状聚合物的特性,可以阻缓或者消除压力传递,随钻井眼强化<sup>[18]</sup>,可自组装,成网成膜。通过接枝化学改性将高分子链连接到纳米粒子的表面,充分发挥了纳米粒子和聚合物各自的优点,实现了无机粒子与聚合物复合粒子结构的设计优化<sup>[19]</sup>。纳米CaCO<sub>3</sub>可为聚合物增强增韧,杂化材料中的亲水酸酐基团吸附在粘土颗粒表面,疏水性苯乙烯链段由于其疏水缔合作用自动组装成胶束,同时杂化材料中纳米级分散的碳酸钙粒子的刚性、尺寸稳定性使得材料能在粘土表面或是井壁上

形成较为致密的有一定强度的膜结构,这种致密高分子膜具有非渗透、疏水性、可变形的特性,在地层孔隙中形成致密的封堵层,阻止钻井液滤液侵入地层,防止泥页岩孔隙或裂隙水化,同时通过强吸附,改善泥饼质量,减少钻井液滤失,有效稳定井壁。成膜剂 CHSM-1 的扫描电镜图如图 3 所示<sup>[1]</sup>。

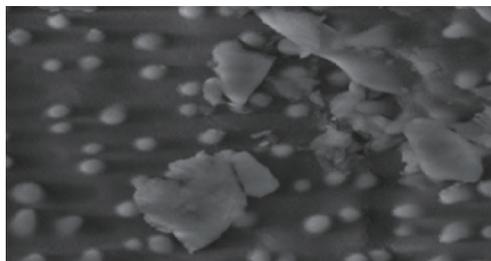


图 3 CHSM-1 电镜扫描图

Fig.3 Image by CHSM-1

#### 2.1.1.2 成膜剂的成膜性评价

评价方法:在 2 份 500 mL 清水中分别加入 20.0 g 样品作平行试验,低速搅拌(3000 r/min)1 min,直接测定 API 滤失量。然后倒入老化罐,在 160 °C 下热滚 16 h,冷却后,低速搅拌(3000 r/min)1 min,测定 API 滤失量。测完滤失量后,将滤膜静置于通风处,自然风干,观察滤膜成膜效果(参见图 4),即成膜剂在滤纸上成膜后,滤纸如同刷上了一层保护胶,

有一定韧性。清水中加入膜剂后,有很好的降失水作用,在清水中的降失水效果见表 1。



(a) 老化前 (b) 老化后

图 4 老化前后成膜滤饼

Fig.4 Film forming filter cakes before and after aging

表 1 成膜评价情况

Table 1 Film forming evaluation

项 目	平行样 1	平行样 2
老化前 API 滤失量/mL	40.00	38.00
160 °C、16 h 后 API 滤失量/mL	58.00	52.00

#### 2.1.1.3 粒度分布评价

4% CHSM-1 试样溶液在不同温度下老化前后的粒径分布评价结果见表 2。

#### 2.1.2 微米级石蜡类封堵剂的优选

##### 2.1.2.1 试验方法及数据

1 g 试样加入到 100 mL 蒸馏水中,高速搅拌(10000 r/min)10 min 后,测得其粒径分布结果见表 3。

表 2 粒度分布评价情况

Table 2 Evaluation of particle size distribution

项 目	粒径范围/ $\mu\text{m}$	D10/ $\mu\text{m}$	D50/ $\mu\text{m}$	D90/ $\mu\text{m}$	D97/ $\mu\text{m}$	D98/ $\mu\text{m}$	体积平均粒径/ $\mu\text{m}$
老化前	0.035~3.289	0.101	0.306	1.244	1.910	2.113	0.480
140 °C/16 h	0.035~3.289	0.087	0.257	1.128	1.853	2.051	0.429
160 °C/16 h	0.035~1.476	0.087	0.238	0.779	1.105	1.164	0.319

注:D10、D50、D90、D97、D98 分别是分布曲线中累积分布为 10%、50%、90%、97%、98% 时的较大颗粒的等效直径(平均粒径)

表 3 石蜡类材料评价数据

Table 3 Evaluation data of paraffin materials

试验材料	不同粒径占比/%				D50/ $\mu\text{m}$	D90/ $\mu\text{m}$	最大粒径/ $\mu\text{m}$
	$\leq 1 \mu\text{m}$	$\leq 6 \mu\text{m}$	$\leq 10 \mu\text{m}$	$\geq 20 \mu\text{m}$			
FMNA-1	6.23	85.75	97.38	0	2.57	6.96	16.6
1号乳化石蜡	3.68	24.71	32.71	51.77	21.20	57.1	>100.0
2号乳化石蜡	8.97	77.49	84.01	7.49	2.30	16.1	61.7
EP-I	8.55	60.81	81.50	0.42	4.22	12.4	25.1
EP-II	1.76	44.70	61.88	19.30	6.99	32.9	>100.0
3号乳化石蜡	2.58	60.57	85.41	0.12	4.82	11.2	21.9

2.1.2.2 评价结果

综合表3数据分析可知,FMNA-1的粒径分布较好,故微米级石蜡封堵剂选用FMNA-1。

2.1.3 沥青类防塌剂优选

2.1.3.1 试验方法及数据

在相同配方中加入相同浓度的沥青,评测其高温(160℃)高压滤失性能及泥饼性能,评测结果见表4及图5。

基浆:2%NV-1+0.5%NaOH+5%JNJS-220+5%DR-8+0.2%DR-10+2%FMNA-1+2%CHSM-1(加重到1.5 g/cm<sup>3</sup>)。

配方①:基浆+2%GLFT-1。

配方②:基浆+2%乳化沥青(胶体)。

配方③:基浆+2%乳化沥青(干粉)。

配方④:基浆+2%阳离子沥青。

2.1.3.2 评价结果

由表4及图5可知,配方④中,加入阳离子沥青,其高温高压滤失量、泥饼厚度及质量均优于加入其它沥青评价样,故选择阳离子沥青作为沥青类封堵防塌剂。

2.2 防塌体系形成及性能

由上述筛选出的各处理剂,并考虑到封堵剂中微米级刚性粒子的填充,在形成配方的基础上加入3%的微米级超细碳酸钙。优化的配方为:2%NV-1+0.5%NaOH+0.2%DR-10+5%DR-8+5%JNJS-220+2%阳离子沥青+2%FMNA-1+2%CHSM-1+3%超细碳酸钙(加重到1.5 g/cm<sup>3</sup>);其基本性能及高温高压泥饼如表5及图6所示。由表5及图6可知,优化配方的常规性能及高温高压泥饼质量良好。

表4 配方性能评价

Table 4 Performance evaluation of various formula

配方	FL <sub>API</sub> /mL	pH 值	流变性					(G <sub>10</sub> /G <sub>10</sub> )/ Pa	FL <sub>HHP</sub> / mL	K <sub>HHP</sub> / mm	实验现象描述
			φ <sub>600</sub> /φ <sub>300</sub>	φ <sub>200</sub> /φ <sub>100</sub>	φ <sub>6</sub> /φ <sub>3</sub>	PV/(mPa·s)	YP/Pa				
①	1.0	9	97/63	50/35	15/14	34	14.5	5.5/14	8.0	2.5	老化后未分层,泥饼浮泥多
②	1.6	9	72/45	25/23	9/8	27	9.0	3/14.5	9.0	3.0	老化后未分层,泥饼浮泥多
③	1.6	9	92/61	46/30	16/15	31	15.0	5/20	8.0	2.5	老化后未分层,泥饼浮泥多
④	1.4	9	97/61	46/30	10/8	36	12.5	3.5/19	6.8	2.0	老化后未分层,泥饼质量好

注:FL<sub>API</sub>—API滤失量;FL<sub>HHP</sub>—高温高压滤失量;K<sub>HHP</sub>—高温高压泥皮厚度。下同



图5 各配方高温高压泥饼

Fig.5 High temperature and high pressure mud cakes for formula evaluation

表5 优化后配方性能

Table 5 Performance of optimized formula

FL <sub>API</sub> /mL	pH值	流变性能					(G <sub>10</sub> /G <sub>10</sub> )/ Pa	FL <sub>HHP</sub> / mL	K <sub>HHP</sub> / mm	实验现象描述
		φ <sub>600</sub> /φ <sub>300</sub>	φ <sub>200</sub> /φ <sub>100</sub>	φ <sub>6</sub> /φ <sub>3</sub>	PV/(mPa·s)	YP/Pa				
1	9.5	95/61	45/33	9/8	34	13.5	3.5/16	4.4	2	泥饼质量好

2.3 防塌体系的性能评价

2.3.1 高温沉降稳定性评价

优化配方在老化72 h后,用M8500型沉降稳定

性测试仪测试其沉降稳定性,其能够实时显示测试过程中样品的温度、浴温、压力、剪切力、剪切速率、转速和粘度;能够模拟高温高压水平井(井斜角0°~

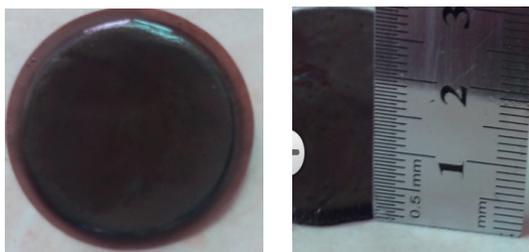


图6 优化后配方高温高压泥饼

Fig.6 High temperature and high pressure mud cake of optimized formula

80°)条件,测定结果如表6所示。

通过M8500型仪器进行高温高压沉降稳定测定,配方在160℃,倾角60°条件下330 min内测定密度差均小于0.013 g/cm<sup>3</sup>,说明优选出的优化配方具

表6 倾角60°的沉降稳定性

Table 6 Settlement stability under 60° angle

配方	转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	温度/ ℃	时间间 隔/min	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	密度差/ (g·cm <sup>-3</sup> )
	0	0	0	1.500	
优化	60	165	90	1.502	0.002
配方	100	165	120	1.511	0.011
	100	165	120	1.513	0.013

有良好的沉降稳定性。

### 2.3.2 高温高压流变性稳定性评价

本研究采用M7500型进口高温高压流变测试仪对钻井液体系进行高温高压流变性能评价,评价结果如图7所示。

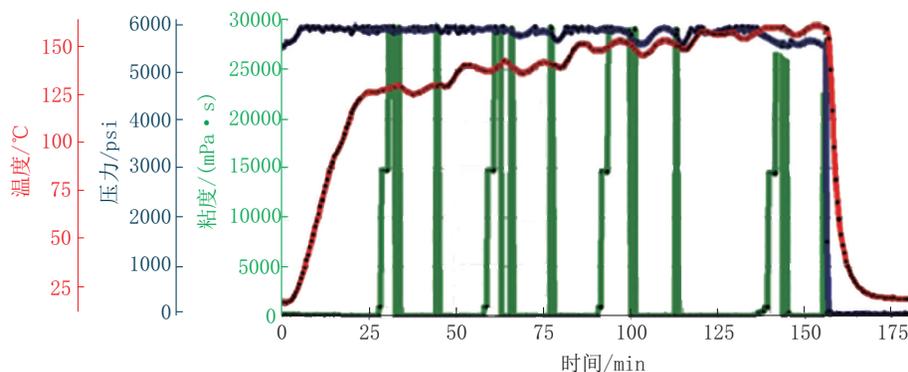


图7 高温高压下的流变性能

Fig.7 Rheological properties at high temperature and pressure

由图7可知:160℃、6000 psi(41 MPa)高温高压条件,随着温度的升高, $\phi_{600}$ 读数变化不大,2.5 h后略有降低。测试样品表现出了良好的高温高压流变性能。

### 2.3.3 抗钙性能评价

基浆配方:2%NV-1+0.5%NaOH+5%JNJS-220+5%DR-8+0.2%DR-10+2%阳离子沥青+2%FMNA-1+2%CHSM-1+3%超细碳酸钙(加重到1.5 g/cm<sup>3</sup>)。

评价配方:

配方①为基浆+1%石膏粉。

配方②为基浆+2%石膏粉。

配方③为基浆+3%石膏粉。

配方④为基浆+4%石膏粉。

配方⑤为基浆+5%石膏粉。

由表7可知,基浆可抗3%的石膏侵,但石膏量达到4%时钻井液明显增稠,到5%则丧失了流动性。

### 2.3.4 抗盐性能评价

基浆配方:3%NV-1+0.5%NaOH+5%JNJS-220+5%DR-8+0.5%DR-10+2%阳离子沥青+2%FMNA-1+2%CHSM-1+3%超细碳酸钙(加重到1.5 g/cm<sup>3</sup>)。

评价配方:

配方①为基浆+3%NaCl。

配方②为基浆+5%NaCl。

配方③为基浆+7%NaCl。

由表8数据可知,配方抗盐可达5%,达到7%,滤失量明显增大。

### 2.3.5 配方的砂床封堵性评价

#### 2.3.5.1 中压砂床评价

基浆配方:3%NV-1+0.5%NaOH+5%JNJS-220+5%DR-8+0.2%DR-10+2%阳离子沥青+2%FMNA-1+2%CHSM-1+3%超细碳酸钙(加

表7 抗钙污染情况

Table 7 Anti-calcium pollution results

配方	FL <sub>API</sub> / mL	pH值	流 变 性					G <sub>10'</sub> /G <sub>10'</sub> / Pa	FL <sub>HHP</sub> / mL	K <sub>HHP</sub> / mm	备 注
			φ <sub>600</sub> /φ <sub>300</sub>	φ <sub>200</sub> /φ <sub>100</sub>	φ <sub>6</sub> /φ <sub>3</sub>	PV/(mPa·s)	YP/Pa				
①	1.2	10	89/57	44/29	10/8	32	12.5	4.5/22	5	2	性能影响不大
②	1.6	9	91/59	44/30	12/10	32	13.5	5/23.5	6.4	2	性能影响不大
③	1.8	9	95/65	48/34	17/15	30	17.5	6.5/24.5	9	3	略有增稠
④	3.8	9	160/108	80/61	34/33	52	28	16/37	15	4	明显增稠
⑤	6.2	8.5	不可测						20	6	明显增稠,滴流

表8 抗盐污染情况

Table 8 Salt pollution resistance results

配方	FL <sub>API</sub> / mL	pH 值	流 变 性					(G <sub>10'</sub> /G <sub>10'</sub> )/ Pa	FL <sub>HHP</sub> / mL	K <sub>HHP</sub> / mm	备 注
			φ <sub>600</sub> /φ <sub>300</sub>	φ <sub>200</sub> /φ <sub>100</sub>	φ <sub>6</sub> /φ <sub>3</sub>	PV/ (mPa·s)	YP/ Pa				
①	2.2	10	72/44	30/21	6/5	28	8	3/11.5	5.2	2	基本无影响
②	3.6	10	73/49	39/29	18/17	29	10	7.5/18	7.2	2	流变性能基本无影响,滤失量略增大
③	7.6	8	68/43	33/24	14/13	25	9	5/17	16	3	开始减稠,滤失量明显超标

重到 1.5 g/cm<sup>3</sup>)。

配好的基浆,在 160 °C 的情况下老化 42 h,进行中压砂床试验,浸入度为 2~5 mm,如图 8 所示。

### 2.3.5.2 高温高压砂床评价

在 160 °C、4.2 MPa 条件下,在泥浆和砂床之间



图8 中压砂床情况

Fig.8 Medium pressure sand bed

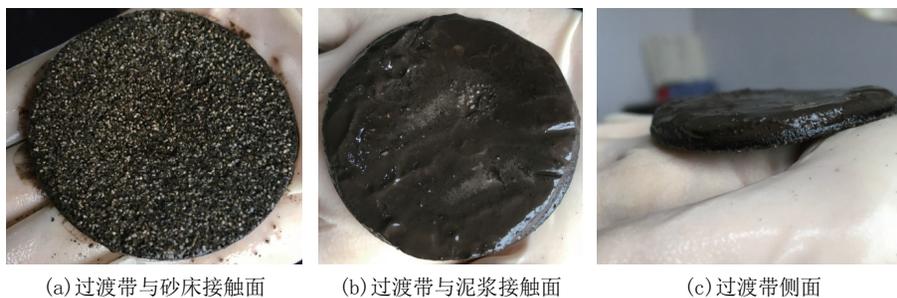
形成了 3 mm 的隔离带,隔离带取出,成形,有一定强度,类似高温高压泥饼,如图 9 所示。

由图 9 可知,该配方钻井液在高温高压下,对 40 目的松散的石英砂胶结成形。而配方中不加成膜剂,在测试高温高压砂床的封堵性能时,石英砂松散、不能胶结成形。说明该配方中的成膜剂杂化物因引入极性基团马来酸酐增加了和各种基材的粘接性能<sup>[20]</sup>,能使松散的石英砂很好地粘结在一起,从而使钻井液具有良好的胶结护壁性能。

### 2.3.6 优化配方与现场钻井液对比评价

#### 2.3.6.1 常规性能对比

①号样:抗高温防塌钻井液配方(优化配方): 3%NV-1+0.5%NaOH+5%JNJS-220+5%DR-8+



(a) 过渡带与砂床接触面

(b) 过渡带与泥浆接触面

(c) 过渡带侧面

图9 高温高压砂床情况

Fig.9 High temperature and high pressure sand bed test results

0.5%DR-10+2% 阳离子沥青+2%FMNA-1+2%CHSM-1+3%超细碳酸钙(加重到 $1.5\text{ g/cm}^3$ )。

②号样:PZ113井钻井液(取样井深:5825 m,取样时间:2018-07-08)。

③号样:PZ115井钻井液(取样井深:5960 m,取

样时间:2018-07-10)。

④号样:YS1井钻井液(取样井深:6746 m,取样时间:2018-08-21)。

对比情况见表9。

表9 常规性能对比

Table 9 General performance comparison

样号	$FL_{API}/$ mL	pH 值	流 变 性			PV/ (mPa·s)	YP/ Pa	$(G_{10^6}/G_{10^3})/$ Pa	$FL_{HTHP}/$ mL	$K_{HTHP}/$ mm	备 注
			$\varphi_{600}/\varphi_{300}$	$\varphi_{200}/\varphi_{100}$	$\varphi_6/\varphi_3$						
①	1.6	10	95/61	45/33	9/8	34	13.5	3.5/16	4.8	2	高温高压泥饼薄且致密,韧性好
②	2.0	10	59/36	29/19	6/5	23	6.5	4.5/13	6	3	高温高压泥饼韧性差,虚泥饼厚
③	3.0	10	69/44	32/23	5/4	25	9.5	5/27	7	3	高温高压泥饼韧性差,虚泥饼厚
④	0.5	10	129/76	56/36	14/12	53	11.5	7.5/17	4	1.5	高温高压泥饼薄,但不致密,韧性差

### 2.3.6.2 抑制性对比

①号样:抗高温防塌钻井液配方。

②号样:PZ113井钻井液(钾石灰聚磺体系)。

③号样:PZ115井钻井液(钾石灰聚磺体系)。

在图10中,绿色曲线为①号样膨胀率曲线,红色曲线为③号样膨胀率曲线,白色曲线为②号样膨胀率曲线。由图10可知,①号样的膨胀率明显小于现场2口井②号样及③号样的膨胀率,这说明该配方钻井液抑制性比现场的钻井液好。

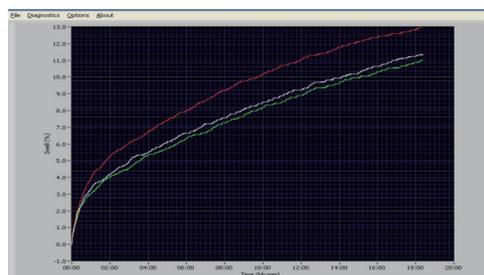


图10 膨胀率对比

Fig.10 Comparison of expansion rates

### 2.3.6.3 封堵性对比

(1)评价样品。

①号样:优化配方钻井液(抗高温防塌钻井液体系)。

②号样:PZ113井钻井液(钾石灰聚磺体系)。

③号样:PZ115井钻井液(钾石灰聚磺体系)。

(2)中压砂床对比情况。

①号样浸入度2~5 mm。

②号样浸入度9~62 mm。

③号样浸入度8~61 mm。

这说明①号样配方在中压下钻井液封堵性比现场的钻井液好。如图11所示。

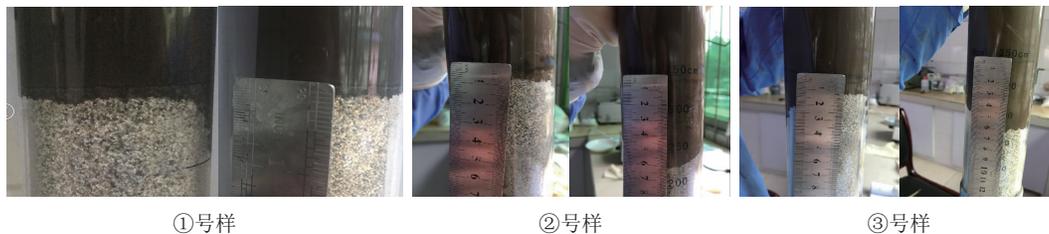


图11 中压砂床对比

Fig.11 Comparison of medium pressure sand bed test results

(3)高温高压砂床对比。

高温高压砂床试验温度 $160\text{ }^\circ\text{C}$ ,试验压力 $4.2$

MPa。

①号样:高温高压砂床形成类似3 mm泥饼的

过渡带,成形性好,石英砂胶结在一起(参见图9)。

②号样(PZ113井):高温高压砂床未形成泥饼,石英砂未胶结在一起,不成形,倒出后松散,无胶结现象。

③号样(PZ115井):高温高压砂床未形成泥饼,石英砂未胶结在一起,不成形,倒出后松散,无胶结现象。

这说明①号样配方在高温高压下对松散的石英砂有一定的胶结作用,其封堵固壁性优于现场的钻井液。

### 3 现场应用

该体系在BZ4-2D井三开施工中应用成功。2019年9月7日4:30用 $\varnothing 165.1$  mm钻头、采用超强成膜防塌钻井液体系三开钻进,9月27日5:09钻至井深6573.77 m甲方通知完钻。2019年9月28日8:00钻头出井,全井完钻,10月18日4:00电测完,10月28日打暂封水泥塞、下钻洗回接筒、回接二开套管固井、全井筒试压合格,全井完井。

该体系在BZ4-2D井三开雷口坡组大斜度井段进行了应用。施工中,使用成膜剂与乳液相配伍,形成超强成膜防塌体系。三开钻井周期21.15 d,设计钻井周期34 d。钻进中,井斜由 $57.5^\circ$ 增加至 $79.9^\circ$ ,再降至 $70.5^\circ$ ,钻进井段为5883~6573.77 m,钻进段长690.77 m,整个钻井施工过程顺利,井下稳定无掉块,保证了旋转导向仪器及井下的安全。完钻前通井电测顺利,裸眼完井。该体系经室内检测,封堵率达99%,现场事故复杂率为0。三开实际钻井周期与设计相比,提速率达37.8%。破碎性地层井径扩大率与前期施工井相比,由17.8%降至7.61%。超强成膜防塌体系现场应用取得了良好的效果。

### 4 结论

(1)成膜剂与乳液形成双封堵的超强成膜特性能很好地解决了川西海相雷口坡组的地层破碎垮塌的技术难题。

(2)形成的超强成膜防塌钻井液体系在现场应用时要依据现场钻井液情况即时进行调整,以充分发挥其超强成膜防塌作用。

(3)该体系仍需开展更多井次的实验,以验证其防塌性能并进一步进行配方优化。

### 参考文献(References):

- [1] 杨仕伟,吕威东,杨国兴,等.膜材料与乳液双效封堵防塌钻井液体系在中江区块两口井的应用[J].地质与勘探,2017,53(1):164-170.  
YANG Shiwei, LÜ Weidong, YANG Guoxing, et al. Application of the plugging anti-sloughing drilling fluid system containing membrane material and emulsion in two wells of the Zhongjiang block[J]. Geology and Exploration, 2017, 53(1):164-170.
- [2] 单文军,段晓青,任福建,等.甘肃武威盆地页岩气“武页1井”成膜低固相冲洗液的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(7):111-115.  
SHAN Wenjun, DUAN Xiaoqing, REN Fujian, et al. Application of low solid film-forming system in well “Wuye-1” in Wuwei Basin of Gansu[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(7):111-115.
- [3] 刘惠.天然及合成高分子有机物对三合土中碳酸钙结晶的影响[D].青岛:中国海洋大学,2014.  
LIU Hui. Influence of the natural and synthetic organic materials on the crystallization of calcium carbonate[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [4] 王元盛.PS/SBS复合材料超临界 $\text{CO}_2$ 挤出发泡的研究[D].广州:华南理工大学,2015.  
WANG Yuansheng. Study of PS/SBS composites extrusion foaming with supercritical  $\text{CO}_2$  [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [5] 周朋朋,栾英豪,马新胜.纳米碳酸钙的改性及应用于聚氯乙烯的研究[J].塑料工业,2014,42(4):89-93.  
ZHOU Pengpeng, LUAN Yinghao, MA Xinsheng. Modification of the nano- $\text{CaCO}_3$  and its application in PVC [J]. China Plastics Industry, 2014, 42(4):89-93.
- [6] 金诚.纳米 $\text{CaCO}_3$ 在ABS工程塑料中的应用研究[D].上海:华东理工大学,2016.  
JIN Cheng. The application of nano- $\text{CaCO}_3$  in ABS engineering plastics [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2016.
- [7] 董源.聚丙烯酯/纳米碳酸钙复合增韧剂的制备及其应用于PVC的改性的研究[D].上海:华东理工大学,2013.  
DONG Yuan. Study on preparation and application of polyacrylate/nano- $\text{CaCO}_3$  to modify poly(vinyl chloride) nanocomposites [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013.
- [8] 桂文君.苯乙烯/马来酸酐共聚物在湿法冶金和材料制备中的应用研究[D].兰州:兰州大学,2016.  
GUI Wenjun. Studies on the application of styrene/maleic anhydride copolymer in hydrometallurgy and material preparation [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- [9] 吴颖.低分子量苯乙烯/马来酸酐共聚物合成及其性能研究[D].广州:广东工业大学,2013.  
WU Ying. The synthesis and properties of the low-molecular-

- weight styrene-maleic anhydride copolymer [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013.
- [10] 邱广明. 苯乙烯和马来酸酐共聚物的合成、及其功能化膜与微球的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- QIU Guangming. Synthesis of styrene and maleic anhydride copolymers and study on their functionalized films and microspheres[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [11] 李小花, 强西怀, 洪新球. 苯乙烯-马来酸酐共聚物及应用[J]. 皮革科学与工程, 2009, 19(2): 42-46.
- LI Xiaohua, QIANG Xihuai, HONG Xinqiu. Polymer of styrene-maleic anhydride and its application evolution [J]. Leather Science and Engineering, 2009, 19(2): 42-46.
- [12] 李祖森. 聚苯乙烯马来酸酐抗真菌改性研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- LI Zusen. The study of poly (styrene-co-maleic anhydride) grafted with borneol capable of resisting fungal contamination [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [13] 张丽珍. 纳米碳酸钙/P(BA-Co-MMA)核壳粒子的制备及其增韧改性PVC的研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2007.
- ZHANG Lizhen. Study on preparation of nano-CaCO<sub>3</sub>/P(BA-Co-MMA) core-shell composites composite particles and its application in toughening PVC [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2007.
- [14] 生瑜, 朱德钦, 邹寅将, 等. 原位固相接枝改性碳酸钙/聚丙烯复合材料[J]. 非金属矿, 2013, 36(4): 46-49.
- SHENG Yu, ZHU Deqin, ZOU Yinjiang, et al. Research progress in preparation and modification of nano calcium carbonate[J]. Non-metallic Mines, 2013, 36(4): 46-49.
- [15] 邹寅将. 原位固相接枝改性碳酸钙在聚丙烯复合材料中的应用[D]. 福州: 福建师范大学, 2013.
- ZOU Yinjiang. The application of CaCO<sub>3</sub> modified by means of solid phase grafting in-situ in PP composites[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2013.
- [16] 王剑峰. 具有核壳结构的CaCO<sub>3</sub>表面包覆改性及其在PP复合材料中的应用[D]. 福州: 福建师范大学, 2008.
- WANG Jianfeng. Study on surface modification of CaCO<sub>3</sub> with core-shell structure and its application in PP composites [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2008.
- [17] 周国永, 曾一文, 李伦满, 等. MA-BA-BMA三元共聚物改性重钙粉体的研究[J]. 无机盐工业, 2014, 46(3): 26-31.
- ZHOU Guoyong, ZENG Yiwen, LI Lunman, et al. Study on modification of ground calcium carbonate with P (MA-BA-BMA) terpolyme [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2014, 46(3): 26-31.
- [18] 李龙, 马茶, 苑旭波, 等. 树枝状聚合物的合成及其在油田化学中的应用[J]. 现代化工, 2012, 32(6): 16-21.
- LI Long, MA Cha, YUAN Xubo, et al. Synthesis and application of dendrimers in oilfield chemistry [J]. Modern Chemical Industry, 2012, 32(6): 16-21.
- [19] 王小梅. 聚丙烯酸酯/纳米碳酸钙共混与共聚改性聚氯乙烯的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2004.
- WANG Xiaomei. Study on polyacrylate/nano-calcium carbonate modifying polyvinyl chloride by blend and copolymerization methods[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2004.
- [20] 宋阳, 刘金贵, 周豪, 等. EVA含量对HDPE和EVA共混接枝马来酸酐粘接树脂粘接性能的影响[J]. 塑料工业, 2013, 41(7): 36-39, 103.
- SONG Yang, LIU Jingui, ZHOU Hao, et al. The effect of EVA content on the adhesive property of HDPE and EVA blend grafted with maleic anhydride adhesive resin [J]. China Plastics Industry, 2013, 41(7): 36-39, 103.

(编辑 荐华)