

# 甲酸盐钻井液完井液研究与应用

王西江<sup>1</sup> 曹华庆<sup>2</sup> 郑秀华<sup>3</sup> 于培志<sup>1</sup>

(1. 中国石化石油工程技术研究院,北京 100101;2. 中国石化华东石油局 钻井工程公司,江苏 镇江 212003;3. 中国地质大学(北京) 工程技术学院,北京 100083)

**摘要:**钻进高温高压地层时,常规高密度钻井液完井液因其重晶石含量高、高温稳定性不好及流变性难以控制等原因,常常不能满足现场钻井和完井的需求。为此,在分析甲酸盐的抑制性、增黏性和毒性的基础上,筛选出了以甲酸盐溶液为基液的甲酸盐钻井液完井液配方,评价了其抑制性、抗污染能力和油层保护效果。甲酸盐钻井液完井液性能评价试验及在库1井的现场应用效果表明,甲酸盐钻井液完井液具有密度可调、高温稳定性好、抑制性强、抗污染能力强、低毒且易降解、油层保护效果好等特点,能很好地满足高温高压地层钻井、完井的需要。

**关键词:**甲酸盐;钻井液;完井液;抑制性;流变性;库1井

**中图分类号:**TE254<sup>+</sup>.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2010)04-0079-04

## Study and Application of Drilling and Completion Fluid Based on Formate

Wang Xijiang<sup>1</sup> Cao Huaqing<sup>2</sup> Zheng Xiuhua<sup>3</sup> Yu Peizhi<sup>1</sup>

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 2. Drilling Engineering Company, East China Petroleum Bureau, Sinopec, Zhenjiang, Jiangsu, 212003, China; 3. College of Engineering Technology, China University of Geosciences, Beijing, 100083, China)

**Abstract:** Commonly used drilling fluids could not meet the requirement when drilling through HPHT formations due to high content of barite, unsteady performance under high temperature, and difficult rheological properties control. Based on the analysis of the inhibition, viscosifying capability and toxicity of formate, the drilling fluid was selected using formate as base fluid. Its inhibition, anti-pollution capacity and formation protection results were evaluated. The selected drilling completion fluid was used in Well Ku-1. The results show that it has adjustable density, high temperature stability and strong inhibition, good compatibility with other conventional mud additives and reservoir, low toxicity and biologically degradation. It meets the requirement of HPHT formation drilling and completion.

**Key words:** formate; drilling fluid; completion fluids; inhibitive ability; rheology; Well Ku-1

甲酸盐是一类无毒环保型钻井液、完井液处理剂,国外在小井眼、大斜度井、大位移井及地层水敏性很强的高难度井钻井施工中,应用了甲酸盐钻井液并取得了很好的效果<sup>[1-4]</sup>。甲酸盐钻井液完井液体系不需添加任何固体加重材料就能获得高密度,达到较高密度时钻井液仍保持低黏、低活度,较好地解决了高密度与滤失及流变性之间的关系<sup>[5]</sup>。目前国内在钻进高温高压小井眼油气井时,在配制高密度钻井液过程中,加入普通固体加重材料,往往会引起钻井液黏度和切力大幅度上升、流动性变差<sup>[6]</sup>。为

此,笔者利用室内试验评价了甲酸盐钻井液完井液的密度调节功能、抑制性、环境保护特性、高温稳定性、可降解特性以及油气层保护特性。现场应用表明,甲酸盐钻井液完井液具有优良的水力性能和流变性能。

**收稿日期:**2009-11-09;**改回日期:**2010-05-29

**作者简介:**王西江(1978—),男,北京人,2001年毕业于吉林大学勘察技术与工程专业,工程师,主要从事石油钻井液技术研究和现场技术服务工作。

**联系方式:**(010)84988195, wangxj@sripe.cn

# 1 甲酸盐特性研究

## 1.1 抑制性试验

甲酸盐的抑制机理主要体现在以下 3 个方面<sup>[7-8]</sup>：

1) 电荷中和。甲酸盐钻井液完井液中离子浓度高,压缩黏土胶体颗粒双电层能力强,使黏土负电性大大减弱,水化膨胀能力降低。

2) 低活度。甲酸盐钻井液完井液中离子浓度高,自由水较少,水的活度低。根据活度平衡理论,其渗透压可使页岩孔隙中的水反向流动,这种反渗透作用使钻井液完井液中的水流向页岩的净流量减小,结果导致页岩水化降低及毛细管压力上升缓慢,有利于井壁稳定。

3) 甲酸盐钻井液完井液的滤液黏度高,使水不易进入地层。甲酸盐钻井液在固相含量很低的情况下密度较高,可减小固相颗粒对地层造成的损害。另外,甲酸根不与黏土发生反应,与地层中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等高价阳离子不生成沉淀,因此储层的渗透率不会降低。

取轮南 13 井水化分散能力强的岩屑,测高温滚

动回收率,结果见表 1。

表 1 抑制性试验结果

配方	滚动回收率, %	
	2. 00 mm <sup>①</sup> 筛孔	0. 45 mm <sup>②</sup> 筛孔
基浆+10% $\text{HCOONa}$	44. 8	61. 1
基浆+10% $\text{HCOOK}$	56. 2	78. 2
基浆+10% $\text{KCl}$	42. 1	66. 4
基浆+10% $\text{K}_2\text{SO}_4$	19. 2	45. 8

注:基浆为 2%膨润土浆;老化条件为 100℃、16 h;①为 10 目标标准筛,筛孔边长 2. 00 mm;②为 40 目标标准筛,筛孔边长 0. 45 mm。

由表 1 可看出,甲酸盐回收率较高。观察回收的岩屑发现,从加入甲酸盐的基浆中回收的岩屑较规则,原始尺寸保持得好,表明甲酸盐的抑制性好。为进一步评价其抑制性,用 X 射线衍射仪测定盐处理前后岩样中主要水敏性黏土矿物(001)的晶面间距,并以此评价其抑制性。

1) 对预水化岩样的抑制性。将岩样置于清水中浸泡 24 h,然后放入不同质量分数的盐试液中,浸泡 24 h,处理后测定其晶间距,结果见表 2。

2) 对盐浸泡后岩样水化的影响。将在盐试液中浸泡 24 h 的岩样,用清水清洗 6 次,测定其晶间距,效果见表 2。

表 2 不同盐对岩样晶面间距影响

预水化岩样			预盐浸岩样			
试液	晶面间距/nm		试液	处理方法	晶面间距/nm	
	蒙脱石	伊利石			蒙脱石	伊利石
清水	1. 600	1. 024	清水	浸泡 24 h	1. 600	1. 024
1% $\text{NaCl}$	1. 528	1. 012	10% $\text{NaCl}$	浸泡 24 h	1. 476	1. 000
3% $\text{NaCl}$	1. 508	1. 000		清洗	1. 476	1. 030
1% $\text{KCl}$	1. 486	1. 000	10% $\text{KCl}$	浸泡 24 h	1. 005	1. 000
3% $\text{KCl}$	1. 388	1. 000		清洗	1. 264	1. 012
1% $\text{HCOOK}$	1. 418	1. 000	10% $\text{HCOOK}$	浸泡 24 h	1. 005	1. 000
3% $\text{HCOOK}$	1. 382	1. 000		清洗	1. 258	1. 010
1% $\text{HCOONa}$	1. 426	0. 992	10% $\text{HCOONa}$	浸泡 24 h	1. 470	1. 000
3% $\text{HCOONa}$	1. 412	0. 998		清洗	1. 478	1. 024

从表 2 可以看出:1)抑制水化膨胀的能力钾盐比钠盐强;2) $\text{HCOOK}$  与  $\text{KCl}$  的抑制性能差别不大;3) $\text{HCOOK}$  的持久抑制能力最强, $\text{KCl}$  次之。

## 1.2 甲酸盐溶液黏度

密度相同的盐水在不同温度下的黏度变化见表 3。从表 3 可以看出,甲酸盐溶液在相同温度下的黏度相对高些,尤其在较高温度下的黏度比其他盐溶液大,这就使甲酸盐钻井液滤液侵入储层的阻力增大,有利于储层保护。

表 3 密度为 1. 10 kg/L 不同盐水的黏度

温度/℃	$\text{HCOOK}$	$\text{HCOONa}$	$\text{KCl}$	$\text{NaCl}$
20	1. 248	1. 912	0. 978	1. 123
30	1. 002	1. 518	0. 804	1. 042
40	0. 850	1. 226	0. 703	0. 851
50	0. 742	1. 100	0. 626	0. 721
60	0. 656	0. 872	0. 562	0. 616
80	0. 550	0. 686	0. 400	0. 526

## 1.3 甲酸盐毒性试验

根据《农用污泥中污染物控制标准》(GB4284—

1985), 农田施用污泥中污染物的最高容许含量应符合允许浓度规定。表 4 为不同盐水中镉(Cd)、汞(Hg)、铅(Pb)、铬(Cr)、砷(As)及其化合物的含量测定结果。从表 4 可以看出, 甲酸盐中有害物质含量低于最高允许含量。

表 4 有害物质测定结果					
盐水类型	Cr/mg · kg <sup>-1</sup>	Cd/mg · kg <sup>-1</sup>	Hg/mg · kg <sup>-1</sup>	Pb/mg · kg <sup>-1</sup>	As/mg · kg <sup>-1</sup>
5% HCOOK	10. 65	0. 50	0. 25	8. 6	4. 35
5% HCOONa	21. 26	0. 50	0. 25	12. 42	6. 51
5% KCl	162. 6	0. 50	0. 25	68. 7	10. 12
允许含量	600. 00	5. 00	5. 00	300. 00	75. 00

表 5 不同钻井液有毒有害物分析结果							
钻井液	Cr/mg · kg <sup>-1</sup>	Cd/mg · kg <sup>-1</sup>	Hg/mg · kg <sup>-1</sup>	Pb/mg · kg <sup>-1</sup>	As/mg · kg <sup>-1</sup>	BOD <sub>5</sub> /COD <sub>cr</sub>	EC <sub>50</sub>
甲酸钾	0. 24	0. 68	0. 05	0. 05	1. 23	26. 5	>10 <sup>5</sup>
两性离子聚合物	0. 28	0. 72	0. 05	0. 05	1. 43	16. 2	>10 <sup>4</sup>

## 2 甲酸盐钻井液性能评价

### 2.1 配方筛选

针对地层特点, 通过大量室内试验, 筛选出甲酸盐钻井液的配方: 1. 5% KAHM + 0. 2% FA367 + 0. 1% CMC-HV + 0. 5% JT888 + 1. 0% FT-1 + 0. 6% XY-27 + 5. 0% QS-2 + 0. 5% SMP-II + 5. 0% 甲酸钾 + 2. 0% 膨润土。

该钻井液的常规性能为: 密度 1. 10 kg/L, 滤失 3. 8 mL, 表观黏度 36 mPa · s, 塑性黏度 24 mPa · s, 动切力 12 Pa, 静切力 1. 0/1. 2 Pa。

### 2.2 页岩回收率试验

选用官 109-1 断块 11 井岩心, 测岩屑回收率。在不同钻井液中加入 50 g 岩屑(过 3. 2~4. 0 mm 筛), 在 120 °C 下热滚 16 h, 用 0. 45 mm 筛回收, 结果见表 6。

表 6 不同钻井液体系的抑制性		
钻井液	回收量/g	回收率, %
聚合物	40. 1	80. 2
有机硅	43. 2	86. 4
甲酸盐	46. 9	93. 8

从表 6 可以看出, 甲酸盐钻井液抑制泥页岩和黏土水化分散运移的性能良好, 优于目前常用的聚合物钻井液和有机硅钻井液。其抑制性机理为<sup>[10]</sup>, 甲酸

GB/T 1541—1994 要求排放限制标准为生物半致死浓度  $EC_{50} > 3 \times 10^4$ , 生物降解性测定结果可生化性  $BOD_5/COD_{cr} > 25$  时为生物易降解性物质<sup>[6]</sup>。表 5 为不同钻井液有毒有害物分析结果。

从表 5 中可以看出, 由于 HCOOK 为强碱弱酸盐, 表现为碱性物质对生物酶有抑制性, 用 HCOOH 中和, 当 pH 为中性时, 生物发光细菌法测得甲酸钾钻井液  $EC_{50} > 10^5$ , 甲酸盐钻井液和两性离子钻井液生物毒性相同, 都对环境无害; 从生物可降解性来看, 甲酸钾钻井液的可生化性  $BOD_5/COD_{cr}$  大于 25, 为容易降解物质, 两性离子聚合物钻井液属于较易降解物质, 所以从生物毒性看, 两者都无毒无害。

盐钻井液完井液的滤液矿化度相对较高, 表面张力小,  $HCOO^-$  与黏土端面的正电荷相吸, 与水之间构成屏障, 防止水化, 稳定黏土, 同时,  $HCOO^-$  和水分子能够形成氢键, 对自由水具有较强的束缚能力, 使甲酸盐钻井液完井液的滤液黏度较高, 不易进入储层。

### 2.3 页岩膨胀性试验

用 NP-01 页岩膨胀测定仪测定二级膨润土 8 h 时的线性膨胀量, 结果见表 7。

表 7 膨润土在不同液体中的膨胀性		
试验液	膨胀量/mm	降低率, %
蒸馏水	6. 18	
聚合物钻井液	2. 64	1. 2
有机硅钻井液	2. 51	63. 1
甲酸盐钻井液	2. 15	68. 4

从表 7 可以看出, 甲酸盐钻井液有很好的页岩稳定性, 膨胀降低率 68. 4%, 主要是由于甲酸盐钻井液滤液黏度高, 降低了滤液中的水向页岩流动的量, 同时, 甲酸盐钻井液自身产生的渗透压能刺激页岩孔隙中的水分流出, 这就降低了页岩的水化速度, 增加了近井地带的强度和有效应力, 能够起到稳定井眼的作用<sup>[11]</sup>。

### 2.4 抗黏土侵能力试验

测定甲酸盐钻井液和两性离子聚合物钻井液抗黏土侵能力试验, 结果见表 8。

表 8 抗黏土侵能力试验

试验液	失水/mL	表观黏度/mPa·s	塑性黏度/mPa·s	动切力/Pa	静切力/Pa
1#	3.8	36	24	12	1.0/1.5
1#+10%膨润土①	4.2	39	28	11	1.5/2.5
2#	4.3	24	16	8	1.0/4.0
2#+10%膨润土②	4.2	60	44	16	7.5/26.0

注:1#为甲酸盐钻井液;2#为两性离子聚合物钻井液;①、②均为老化 72 h。

钻井液抗污染能力的强弱不仅说明钻井液抑制性的强弱,而且直接关系着钻井液的抑制造浆能力和钻井液密度的控制。从表 8 可以看出,固相污染对甲酸盐钻井液体系只有轻微影响,抗固相污染的能力比两性离子聚合物钻井液要强。

2.5 油层保护效果

用 JHDS 高温高压动失水仪,在 300 r/min、100 ℃、3.0 MPa 下进行动态损害试验,结果见表 9。由表 9 可以看出,甲酸钾钻井液的渗透率恢复率

表 9 岩样渗透率损害评价

钻井液	孔隙直径/ $\mu\text{m}$	孔隙度, %	$K_a/10^3 \mu\text{m}^2$	$K_o/10^3 \mu\text{m}^2$	$K_{o0}/10^3 \mu\text{m}^2$	渗透率恢复率, %
聚合物	8.10	28.80	16.10	7.20	4.50	62.8
有机硅	6.54	15.20	12.10	5.10	3.60	65.5
甲酸钾	7.40	24.60	14.70	6.64	5.82	88.2

注: $K_a$ 为空气渗透率; $K_o$ 为油相渗透率; $K_{o0}$ 为污染后的渗透率。  
明显高于其他两种钻井液,具有良好的油层保护效果。

综合分析以上试验结果可知,甲酸钾钻井液体系的最大特点是密度高,抑制能力强,非常适用于地层压力系数高的地层和各种复杂地层,如异常高压地层、盐岩层、石膏层以及易吸水膨胀或崩裂地层等;它不仅具有性能稳定、滤失量容易控制、抗污染能力强等特性,而且与聚合物配伍使用还具有良好的润滑性<sup>[12]</sup>。

3 在库 1 井完井中的应用

3.1 完井液室内性能

库 1 井完钻井深 6 941.15 m,人工井底 6 915.00 m,井内钻井液密度为 1.85~1.90 kg/L,为水基钻井液,测试井段的地层压力系数达 1.65,井底温度高达 167 ℃。该井需要解决两个技术难点:首先,完井液在高温下的性能必须稳定,不能出现沉淀;其次,在 10 d 之内完井液性能不能发生变化。针对上述问题,按基本配方配制了密度 1.5 kg/L、黏度 50~70 s 的无固相甲酸钾射孔液小样,并测试其高温下的稳定性。库 1 井完井液的室内主要性能见表 10。

表 10 库 1 井完井液高温稳定性试验结果

配方	密度/ $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$		黏度/s	
	常温	168 ℃ 高温 滚动	常温	168 ℃ 高温 滚动
基浆	1.50	1.50	35	35
基浆+3.0%Visco2	1.50	1.50	80	58
基浆+1.0%XC	1.50	1.50	85	35
基浆+0.8%PAC-HV	1.50	1.50	65	57
基浆+1.0%PAC-HV	1.50	1.50	75	70

注:基浆为清水+甲酸钾。

由表 10 可看出:高温滚动后,无固相甲酸盐完井液无沉淀,无结晶,密度无任何变化;从增黏剂的选择上看,PAC-HV 效果最好。设计完井液结构:下部 3 050 m 钻井液采用密度 1.45 kg/L 的无固相甲酸钾完井液,上部 3 000 m 井段采用铁矿粉加重的密度为 1.70 kg/L 的聚磺钻井液,中部 200 m 用 1.45 kg/L 的甲酸钾钻井液稠垫液相隔。具体的复合完井液配方为:无固相甲酸盐完井液(3 050 m)+高黏钻井液稠垫(200 m)+聚磺加重钻井液(3 000 m)。

3.2 现场应用

1) 按配方配制 60 m<sup>3</sup> 压井液,下钻循环钻井液,井内返出钻井液密度 1.62~1.72 kg/L,全井压井液加重至 2.10 kg/L。

2) 配制甲酸钾无固相完井液,其性能为:密度 1.50 kg/L,漏斗黏度 54 s,Cl<sup>-</sup> 的质量浓度 4 015 mg/L。至第一次射孔测试前共配制、储备甲酸盐无固相完井液 190 m<sup>3</sup>。用泵车把甲酸盐无固相完井液泵入井内,替出井内压井液。

3) 用密度为 2.10 kg/L 的压井液反循环压井,射孔后压井返出甲酸盐无固相完井液。其性能为:密度 1.50 kg/L,漏斗黏度 45 s,Cl<sup>-</sup> 质量浓度 8 080 mg/L。甲酸钾无固相完井液高温下性能稳定,无沉淀。

### 3.3 应用效果

库 1 井第一层测试表明:无固相甲酸钾完井液高温稳定性好,与处理剂配伍性好,不需加任何固体加重材料就能获得高密度,选用无固相射孔液,避免了射孔后固相颗粒对地层的污染;无固相甲酸钾完井液体系中无悬浮颗粒,减少了钻井液加重剂的沉淀,保证了测试作业的顺利实施。

## 4 结论及建议

1) 甲酸盐钻井液可根据实际需要调节密度,以降低摩阻、提高钻速、缩短钻井周期;可配制无固相钻井液,保护油气层;同时,甲酸盐钻井液可抗高温,性能稳定,有极强的抑制性;与处理剂、储层岩石和流体配伍性好,抗盐、抗钙和抗污染能力强;低毒且易生物降解,有利于保护环境。

2) 无固相甲酸盐完井液体系不需加任何固体加重材料就能获得高密度,其体系中无悬浮颗粒,结晶温度低,高温下稳定性好,不损害产层,可提高采收率、增加产能、延长生产期。

3) 甲酸盐作为钻井液、完井液、修井液和压井液处理剂,已成功应用于高温高压油气井,完全达到了高温高压油气井对钻井液完井液在水力传输、井

控、井壁稳定和油气井产量等方面的要求,作为高密度卤盐的替代物,具有广阔的发展前景。

4) 国内使用甲酸盐时,常同加重剂或膨润土一起使用,对其优异的性能影响极大,针对国外的应用经验,建议使用纯甲酸盐溶液作为油气井钻井完井液体系;另外,建议加强对甲酸铯的研究,研制甲酸铯钻井液、完井液。

## 参 考 文 献

[1] Berg P C, Pedersen E S, Åshild Lauritsen, et al. Drilling, completion, and openhole formation evaluation of high-angle HPHT wells in high density cesium formate brine: the Kvitebjørn experience[R]. SPE/IADC 105733, 2007.

[2] 樊世忠, 何纶. 国内外油气层保护技术的新发展( I )——钻井完井液体系[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(1): 1-5.

[3] Michael A S, Saeed A R, Darrell F. Application and recycling of sodium and potassium formate brine drilling fluids for Ghwar Field HT gas wells[R]. OTC 19801, 2009.

[4] 沙东, 汤新国, 许绍营. 甲酸盐无固相钻井液体系在大港滩海地区的应用[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(2): 29-32.

[5] 阎醒. 用作钻井液和完井液的甲酸盐溶液[J]. 钻采工艺, 2001, 24(5): 77-80, 90.

[4] 徐同台, 赵敏, 熊友明. 保护油气层技术[M]. 2 版. 北京: 石油工业出版社, 2003: 68-100.

[7] 王利中. 甲酸盐钻井完井液体系室内研究[J]. 西部探矿工程, 2003, 15(7): 77-79.

[8] 李志勇, 鄢捷年, 王建华, 等. 新型甲酸盐/正电聚醇钻井液研究[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(5): 34-38.

[9] 陈乐亮, 汪桂娟. 甲酸盐基钻井液完井液体系综述[J]. 钻井液与完井液, 2003, 20(1): 31-36.

[10] 李杨, 王松, 刘二平, 等. 新型无固相甲酸盐完井液研制及性能评价[J]. 精细石油化工进展, 2008, 9(2): 1-3, 7.

[11] 刘志良, 周大辉, 王凤屏, 等. 高密度甲酸钾钻井液的研究[J]. 新疆石油天然气, 2008, 4(3): 45-48.

[12] 刘斌, 徐金凤, 蓝强, 等. 甲酸盐及其在钻井液中的应用[J]. 西部探矿工程, 2007, 19(12): 73-77.

[审稿 鄢捷年]

## Addax 公司尼日利亚探井 UDELE-3 井喜获高产油流

尼日利亚 137 区块 UDELE-3 探井是中国石化国际石油勘探开发公司 Addax 公司 2010 年的首口探井,该井在钻井过程中发现:含油层 2 层,累计油层厚度 63.09 m;气层 4 层,累计气层厚度 19.20 m。该井完井后对主力油层进行了 TSD 测试,主力油层厚度 45.90 m,射开厚度 30.48 m,在  $\phi 17.5$  mm 油嘴条件下,日产原油 534.97 m<sup>3</sup>,天然气  $2.83 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,井口压力稳定在 1 379.3 kPa。UDELE-3 探井喜获高产油流,展示了 137 区块巨大的勘探开发前景。