

# 一种高选择性渗透水泥浆体系研究

全红平<sup>1,2</sup>, 刘勇<sup>3</sup>, 张利明<sup>3</sup>, 刘建新<sup>3</sup>, 王斌<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学 化学化工学院, 四川 成都 610500;

2. 西南石油大学 油气田应用化学四川省重点实验室, 四川 成都 610500;

3. 新疆克拉玛依市胜利路 48 号, 新疆 克拉玛依 83400)

**摘要:** 研究了一种对油水选择性高渗透新型水泥浆体系, 即乳化油水泥浆体系。通过正交实验考查了不同配方下的水泥石的水相、油相渗透率及抗压强度, 从数据分析可知该水泥石油相渗透率均远大于水相渗透率, 并具有高的抗压强度; 水泥石防砂性能测试表明: 该水泥石能够阻挡粒径大于 0.074 mm 的砂砾通过; 同时由电镜扫描进一步证明了该水泥浆体系所形成的水泥石具有良好的渗透性和防砂能力。

**关键词:** 选择性; 水泥石; 乳化; 渗透性; 电镜

**中图分类号:** TE256; TE26; TE3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2015)03-0071-04

## A cement slurry with strong selective permeability

QUAN Hong-ping<sup>1,2</sup>, LIU Yong<sup>3</sup>, ZHANG Li-min<sup>3</sup>, LIU Jian-xin<sup>3</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Oil & Gas Field Applied Chemistry Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. No. 48 Victory Road Karamay City, Karamay 83400, China)

**Abstract:** A cement slurry system with strong selective permeability to oil and water, namely a emulsified oil cement slurry system, is studied. The orthogonal experiments are adopted to investigate the effects of oil and water permeability and compressive strength of the cement stones with different cement formulations. The results show that oil permeability is much better than water permeability and the high compressive strength of the cement stones can be achieved as well. The test data of sand control ability indicate that these cement stones can prevent the sands with particle diameters above 0.074 mm. The scanning electron micrograph further proves that obtained cement stone has good permeability and sand control ability.

**Key words:** selectivity; cement stone; emulsion; permeability; SEM

由于地层的非均质性 & 油藏砂岩胶结疏松, 在油气井开采过程中很容易出砂。油井出砂加重了地面和井下设备磨蚀, 大大缩减了其使用寿命, 出砂严重时易造成砂埋油层, 堵死油管或井筒, 甚至发生地层垮塌使油井报废<sup>[1-2]</sup>。随着石油工业的高速发展, 防砂技术的不断完善和日趋成熟, 开发了不同的防砂工艺技术, 主要包括机械防砂、化学防砂及复合防砂工艺。目前, 油田中主要采用绕丝筛管防砂和化学防砂工艺, 然而绕丝筛管防砂后期处理困难, 易造成转大修问题, 增加使用成本; 化学防砂工艺风险大, 易在井筒内沉积固化形成堵塞<sup>[3-4]</sup>。相比之下, 选择性渗透水泥具有使用寿命长、选择性高、堵塞强度高、耐温耐刷性好的特点, 对普通防砂工艺难处理的已垮塌地层、油层细砂、粉砂等具有很好的适用性, 同时对开发在低渗、裂缝型、油水同层等油气藏的固井及开采过程中的堵漏、堵水、防砂、保护油气层等方面具有巨大的发展潜力和应用价值<sup>[5-7]</sup>。笔者研究了一种乳化油型油溶性水泥浆体系, 并对其进行了一系列的性能评价。

## 1 实验部分

### 1.1 主要试剂与仪器

G 级油井用水泥; 乳化剂 span80 和 Tween80; 石英砂 (50 ~ 100 目); 油 TW3; 0# 柴油; 减阻剂 Sxy-2; 降滤失剂 SZ1-2; PGW; CaCl<sub>2</sub> 粉末等。DFC-0710B 型增压稠化仪, 沈阳金欧科石油仪器技术开发公司生产; Quanta 450 环境扫描电子显微镜, 美国 FEZ 公司生产; GGS71-A 高温高压失水仪, 青岛洪洋石油机械制造有限公司生产; NYL-300 型压力试验机, 天津安瑞仪器仪表有限公司生产; 2PB1040 型平流泵, 北京卫星制造厂生产; B25 乳化机, 上海五相仪器仪表有限公司生产; S212 恒速搅拌器, 上海申顺生物科技有限公司生产; 恒温水浴锅; 烘箱等。

### 1.2 水泥石渗透率测试

将制备好的水泥石放置于 100℃ 的烘箱内烘干, 然后分别放入 0# 柴油和地层水中浸泡 24 h, 最后分别用 0# 柴油和地层水驱替相应浸泡的岩芯。实验过程参照石油行业标准 SY/T 5336-2006。

### 1.3 水泥浆的滤失量测定

水泥浆的滤失量过大会影响水泥浆的流变性能,从而使稠化时间变短,易造成水敏性层段坍塌,严重时导致固井失败。水泥浆滤失量测定参照石油行业标准 SY/T 6453—2000。

### 1.4 水泥石抗压强度测试

水泥石如果没有足够的强度抗击地层应力作用可能会发生破裂,从而影响水泥石的使用寿命及相应的性能。水泥石的抗压强度测试参照石油行业标准 SY/T 5276—2000。

### 1.5 水泥石的制作

将一定质量的乳化剂(质量比  $m(\text{Span80}) : m(\text{Tween80}) = 1 : 8$ )中的 Span80、Tween80 分别加入到油和水中进行搅匀,然后将溶有 Tween80 的水倒入溶有 Span80 的油杯中进行初步搅匀,两者混合液用高速乳化机乳化 15 min,依次向乳液中加入一定质量的水泥灰、PGW、减阻剂、降失水剂、石英砂和氯化钙粉末,每加一样后都用玻璃棒搅匀,加剂完毕后将水泥浆用带搅拌杆的电机在 900 r/min 下高速搅拌约 5 min,使得各添加剂在水泥浆中混合均匀。将配好的水泥浆倒入磨具中封口,放置到温度为 70℃ 的水浴锅中恒温 36 h 左右,将凝固后的水泥块取芯,修整两端面,然后用砂纸打磨平整。后将制好的岩芯洗净放置在 100℃ 的烘箱中烘烤 6 h 左右,再将水泥岩芯分 2 组,分别放入地层水和柴油中浸泡

24 h,最后进行岩芯流动性实验。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 水灰比的确定

在油水体积比为 0.4,  $\text{CaCl}_2$  质量分数为 0.9% (占油水灰三者总质量分数),减阻剂 Sxy-2 质量分数为 0.4%,降失水剂 SZ1-2 质量分数为 1.5%,石英砂质量分数为 30%,PGW 质量分数为 2%,乳化剂质量分数为 3% (其他占水泥质量分数)的条件下,确定水泥浆的水灰质量比,实验结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出,水灰比在 0.5~0.7 范围内流动性及渗透性较好。综合水泥浆的流动性、抗压强度、渗透率,选取水灰比为 0.5 比较合适,因为水灰比为 0.6 和 0.7 的水泥浆流动性很好,但是对石英砂的悬浮能力较弱,与水灰比为 0.5 的水泥浆相比较三者的渗透率变化相差不多,而水灰比为 0.5 的岩芯抗压强度更高。因此,选用水灰比为 0.5 的浆体,既可以满足灌注的要求,凝固后又有足够的抗压强度和渗透率。

表 1 不同水灰比下的水泥浆的物理特性

水灰比	0.43	0.5	0.6	0.7
密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	1.85	1.73	1.64	1.57
稠度系数/K	6.683	0.521	0.170	0.088
油相渗透率/ $\mu\text{m}^2$	2.357	5.979	6.533	6.869
油驱后抗压强度/MPa	16.33	13.58	8.67	5.25

(上接第 70 页)

[4] M Rusch gen Klaas, Warwel S. Complete and partial epoxidation of plant oils by lipase-catalyzed perhydrolysis[J]. *Industrial Crops and Product*, 1999, 9: 125-132.

[5] Faria-Machado A F, Silva M A, Vieira M G A, et al. Epoxidation of modified natural plasticizer obtained from rice fatty acids and application on polyvinylchloride films[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 127(5): 3542-3549.

[6] Xu Y Q, Qu J P. Mechanical and rheological properties of epoxidized soybean oil plasticized poly(lactic acid)[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 112(6): 3185-3191.

[7] 沈健,章金富,王艳涛,等.一种改性脂肪酸酯增塑剂的制备方法:中国,201010298464.7[P].2010-09-30.

[8] 赵敏仲,孙达,赵占群.一种地沟油生产环氧脂肪酸甲酯的方法:中国,201110072671.5[P].2011-08-04.

[9] 李祥庆.利用废弃油脂生产环氧增塑剂的方法:中国,200710022603.1[P].2007-05-22.

[10] 梁斌.生物柴油的生产技术[J].*化工进展*, 2005, 24(6): 577-585.

[11] Goldberg K M, Fal'kovich M M, Zarskii I A. Continuous alcoholysis [of vegetable oils] with sonic vibrations[J]. *Journal Written in*

Russian, 1966, 2: 62-67.

[12] 计建炳,徐之超,王建黎,等.水力空化制备生物柴油的方法:中国,20071301312.1[P].2007-01-21.

[13] Breccia A, Esposito B, Fratadocchi G B, et al. Reaction between methanol and commercial seed oils under microwave irradiation [J]. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 1999, 34(1): 2-8.

[14] Senthil Kumar P, Siva Kumar M, Pandit A B. Experimental quantification of chemical effects of hydrodynamic cavitation[J]. *Chemical Engineering Science*, 2000, 55(9): 1632-1639.

[15] 李志义,张晓冬,刘学武,等.水力空化及其对化工过程的强化作用[J].*化学工程*, 2004, 32(4): 27-29.

[16] 张林夫,夏维洪.空化与空蚀[M].南京:河海大学出版社, 1989: 3-8.

[17] 何相君,聂勇,陆向红,等.水力空化强化制备生物柴油过程的研究[J].*精细石油化工进展*, 2011, 12: 47-51.

[18] 周燕君,陆向红,俞云良,等.水力空化技术强化高酸值油脂脱酸反应[J].*太阳能学报*, 2010, 31(12): 1531-1536.

[19] Pandit A B, Joshi J B. Hydrolysis of fatty oils-effect of cavitation [J]. *Chemical Engineering Science*, 1993, 48(19): 3440-3442. ■

## 2.2 降滤失剂加量的确定

在水油体积比为 0.4, 水灰比为 0.5,  $\text{CaCl}_2$  质量分数为 1%, 减阻剂  $\text{S}_{xy}-2$  质量分数为 0.4%, 石英砂质量分数为 30%, PGW 质量分数为 2%, 乳化剂质量分数为 3% (以上加量百分数同表 1) 的条件下, 确定水泥浆的降滤失剂加量, 实验结果如表 2 所示。从表 2 可知, 随着降滤失剂加量增加, 水泥浆的滤失量逐渐减小。在加量为 1.5% 以上可使水泥浆的标准 API 失水量控制在 50 mL 以下, 因此从成本考虑选取降滤失剂质量分数为 1.5% 比较适合。

表 2 降滤失剂质量分数对水泥浆失水的影响

$w(\text{SZ1}-2)/\%$	1.00	1.50	2.00	2.50
滤失量/mL	72	38	27	16

## 2.3 正交实验结果

在一系列单因素实验后, 选取其中主要的 5 个因素(油水体积比、PGW 质量分数、乳化剂质量分数、石英砂质量分数及氯化钙质量分数)进行了五因素四水平的正交实验, 实验中减阻剂质量分数为 0.4%, 降滤失剂质量分数为 1.5%, 水灰比为 0.5, 实验结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出, 油相渗透率远大于水相渗透率, 且比值都在 2 以上, 可以说明该研制的水泥石具有明显的亲油疏水特点, 这主

表 3 正交实验结果

序号	油水 体积 比	$w(\text{PGW})/\%$	$w(\text{乳化剂})/\%$	$w(\text{石英砂})/\%$	$w(\text{CaCl}_2)/\%$	水相 渗透 率/ $\mu\text{m}^2$	油相 渗透 率/ $\mu\text{m}^2$	油驱后 抗压强 度/ MPa
1	0.2	1	1	20	0.70	0.224	0.518	18.37
2	0.2	2	2	30	0.80	0.313	1.204	16.34
3	0.2	3	3	40	0.90	0.628	3.928	15.06
4	0.2	4	4	50	1.00	0.529	2.435	15.93
5	0.3	1	2	40	1.00	0.526	6.087	13.89
6	0.3	2	1	50	0.90	0.384	5.746	14.12
7	0.3	3	4	20	0.80	0.330	2.434	15.84
8	0.3	4	3	30	0.70	0.352	2.723	15.46
9	0.4	1	3	50	0.80	0.368	5.610	14.56
10	0.4	2	4	40	0.70	0.326	2.466	15.73
11	0.4	3	1	30	1.00	0.560	6.189	13.16
12	0.4	4	2	20	0.90	0.574	6.764	12.76
13	0.5	1	4	30	0.90	0.763	9.657	11.13
14	0.5	2	3	20	1.00	0.735	9.526	11.67
15	0.5	3	2	50	0.70	0.606	7.862	13.97
16	0.5	4	1	40	0.80	0.952	15.047	10.61

要是因为油 TW3 为油溶性物质, 分散在水泥石中, 当用柴油驱替后将油溶解带出, 增加了岩石内部孔隙, 并形成了亲油性壁面; 同时水泥浆凝固过程中双电层的形成及局部高电荷分布, 使得极性的水分子通过孔道时受电荷诱导作用的影响, 从而流动阻力较大, 而极性小的油分子流过孔道时, 所受的诱导阻力几乎没有<sup>[6,8-9]</sup>。因此使得水相和油相渗透率相差较大, 油相渗透率远大于水相渗透率。

以油相渗透率为考察标准, 对表 3 的数据进行分析, 结果如表 4 所示。在表 4 中,  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$  为五因素四个水平所对应的油相渗透率的加和, 而  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  及  $k_4$  依次对应  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  及  $K_4$  的平均值。

表 4 实验结果分析

项目	油水 体积比	$m(\text{PGW})/\text{g}$	$m(\text{乳化剂})/\text{g}$	$m(\text{石英砂})/\text{g}$	$m(\text{CaCl}_2)/\text{g}$
$K_1$	8.085	21.872	27.500	19.241	13.568
$K_2$	16.990	18.942	21.918	19.773	24.296
$K_3$	21.029	20.413	21.787	27.529	26.095
$K_4$	42.092	26.969	16.992	21.653	24.237
$k_1$	2.695	7.291	9.167	6.414	4.523
$k_2$	5.663	6.314	7.306	6.591	8.099
$k_3$	7.010	6.804	7.262	9.176	8.698
$k_4$	14.031	8.990	5.664	7.218	8.079
$R$	11.336	2.676	3.503	2.762	4.176

从表 4 可以看出, 5 个对水泥石油相渗透率的影响因素的大小为: 油水体积比 >  $\text{CaCl}_2$  质量分数 > 乳化剂质量分数 > 石英砂质量分数 > PGW 质量分数。油水体积比对油相渗透率影响近似指数增长的趋势, PGW 质量分数也对渗透率起正增长趋势, 乳化剂质量分数对渗透率呈负增长趋势, 石英砂质量分数和  $\text{CaCl}_2$  质量分数对渗透率的影响先增加后下降, 在石英砂质量分数为 40%,  $\text{CaCl}_2$  质量分数为 0.9% 时, 油相渗透率最大。这是由于增大油的质量分数可以增加水泥石的内部孔隙, 增大 PGW 的质量分数可以增强孔隙间的连通, 一定的乳化剂可将油很好地分散在水泥浆中, 而加量过大时油滴分散得越细, 使得水泥石孔隙较细, 从影响水泥石的渗透性。适量的石英砂可以增强水泥石的渗透性, 氯化钙的质量分数可以影响水泥浆的水化进程及电荷分布, 进而影响水泥石内部微观结构及渗透性。

## 2.4 水泥石防砂性能

选取正交实验中渗透性好的岩样进行防砂性能

评价。将岩芯放入岩芯夹持器中,然后在进口端分别放入 0.25 mm 以上、0.25 ~ 0.177 mm、0.177 ~ 0.125 mm、0.105 ~ 0.074 mm、0.074 mm 以下的石英砂压实,用 0# 柴油驱替,考察水泥石的出砂情况,结果如表 5 所示。

表 5 水泥石防砂性能

粒径/mm	>0.25	0.25 ~ 0.177	0.177 ~ 0.125	0.105 ~ 0.074	<0.074
出砂情况	无	无	无	无	有

从表 5 可以看出,在柴油驱替过程中,粒径大于 0.074 mm 的砂砾在流出液中不可见;而小于 0.074 mm 的砂砾在流出液中可见。因此,说明该水泥石具有阻挡粒径大于 0.074 mm 砂砾的能力。

## 2.5 电镜实验分析

从上述实验中选取渗透性好的水泥石及纯水样水泥石,通过电镜分析其内部微观结构,考察用油乳化后的水泥石微观结构的变化,结果如图 1 所示。

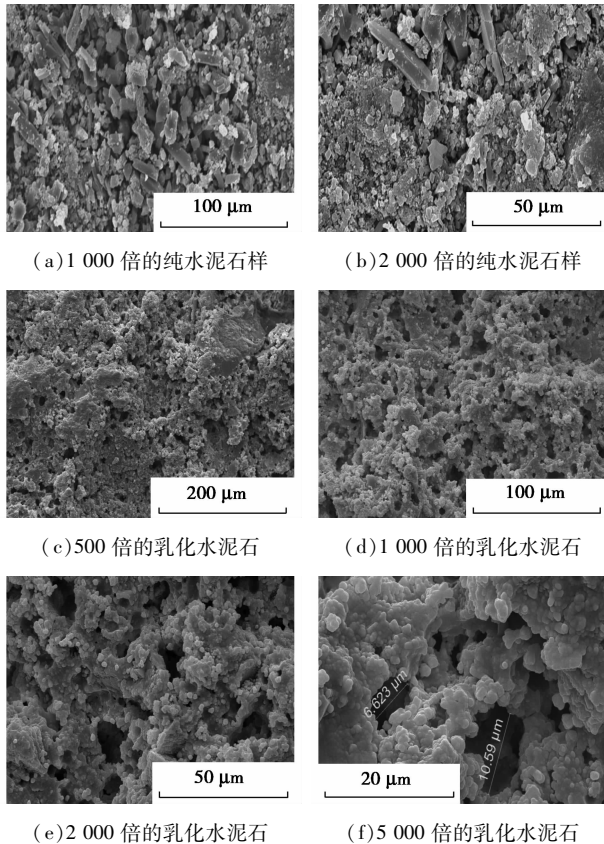


图 1 用油乳化后的水泥石微观结构

从图 1 可以看出,普通的纯水样水泥石的堆砌紧密,基本看不到任何孔隙;而在相同倍数下的乳化油水泥石很明显可以看到内部充满着细小的空洞,相互连通构成渗流空间网络结构。这是由于油不参

与水泥的水化过程,均匀地分散在水泥石中,经过柴油浸泡驱替后,柴油将油溶解带出,原来由油占据的空间就变成了无数的孔隙;实验中选取 PGW 做连通剂,在水泥水化、硬化过程中始终保持着很好的流动性以及微小孔隙中的可渗透性,驱替后 PGW 占据的空间仍然保留,增加了水泥石凝固后的渗流孔道数量,也使得油所产生的孔隙之间相互连通,从而使得水泥石的渗透率大大提高<sup>[10]</sup>。从图 1(f) 可看出,水泥石孔道尺寸远远小于砂砾颗粒,砂砾太大而被阻挡在外,从而达到了固井、防砂的效果。

## 3 结论

(1) 以水包油型乳化水泥浆、PGW 为连通剂和相渗透剂研制出了一种对油水选择性渗透能力强的新型水泥浆体系。

(2) 通过正交实验得到了不同渗透性及抗压强度的水泥石配方,其抗压强度可达 10.61 ~ 18.37 MPa,油相渗透率可达 0.518 ~ 15.047  $\mu\text{m}^2$ ,能适应不同地层需要,并具有满足施工要求的抗压强度和渗透性。

(3) 该水泥石的油相渗透率均远大于水相渗透率,具有很好的固井、堵水、防砂的作用,同时对地层的伤害小。

## 参考文献

- [1] 焦国盈,谭芳,等.稠油防砂工艺综述[J].低渗透油气田,2005,10(4):32-34.
- [2] 张晶.适合于套变井的新型化学防砂技术研究[D].北京:中国石油大学,2004.
- [3] 陈二丁.可渗透性微细水泥体系防砂技术研究[D].成都:西南石油大学,2002.
- [4] 刘大红,宋秀英,张恒,等.选择性渗透水泥石[J].钻井液完井液,2002,19(5):19-22.
- [5] 陈二丁,刘崇健,陈大钧.渗透性水泥体系研究[J].钻采工艺,2003,26(1):88-90.
- [6] 丁达,刘洪来,牟伯中,等.选择性渗透水泥石作用机理[J].华东理工大学学报:自然科学版,2005,31(4):528-531.
- [7] 步玉环,付怀刚,穆海朋.油溶性水泥材料优选试验研究[J].石油钻探技术,2008,36(3):62-65.
- [8] 刘少华,朱汉荣.聚乙二醇与钙离子相互作用的研究[J].生物医学工程杂志,1990,7(4):329-331.
- [9] M'Pandou A, Stiffer B. Polyethyleneglycol adsorption at the  $\text{TiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  interface: Distortion of ionic structure and shear plane position [J]. Colloid and Surface, 1987, 24: 159-172.
- [10] 付怀刚.油溶性水泥浆体系研究[D].北京:中国石油大学,2007. ■