

大尺寸井眼固井活性冲洗液体系作用效能与机理研究

曾培华^{1,2,3}, 严海兵^{1,3}, 刘强⁴, 张作宏^{1,2,3}, 马勇⁵, 张建新², 刘华治^{1,2,3}

(1. 川庆钻探工程有限公司井下作业公司, 四川成都 610052; 2. 四川川庆井下科技有限公司, 四川广汉 618300;
3. 油气田应用化学四川省重点实验室, 四川成都 610500; 4. 川庆钻探工程有限公司川西钻探公司, 四川成都
610066; 5. 中国石油西南油气田分公司, 四川成都 610051)

摘要: 针对超深井大尺寸井眼环空低返速工况下, 常规冲洗液对钻井液滤饼冲洗效率低导致固井质量差的难题, 本文通过高温高压动态清洗装置对比分析了不同混浆比例、冲洗速度、渗透率条件下, 活性冲洗液在提升混浆强度、冲洗效率、促进二界面胶结强度发展方面的效能, 并对冲洗后的固井二界面进行扫描电镜分析。结果表明: 活性冲洗液体系的混浆强度较常规冲洗液可提升1倍以上; 对比清水和常规冲洗液体系, 活性冲洗液体系的滤饼冲洗效率达95%, 具有显著的滤饼提升作用; 模拟不同流速的冲洗情况发现, 活性冲洗液体系在较低冲洗速度下的冲洗效率>90%。现场施工表明, 活性冲洗液可有效提升混浆强度与固井二界面的胶结强度, 从而显著提高大尺寸井眼固井施工质量, 具有良好的应用前景。

关键词: 大尺寸井眼; 固井质量; 低返速; 活性冲洗液; 胶结强度; 超深井

中图分类号: TE254; P634.6 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2025)06-0060-07

Study on the efficiency and mechanism of the active flushing fluid system for large-size borehole cementing

ZENG Peihua^{1,2,3}, YAN Haibing^{1,3}, LIU Qiang⁴, ZHANG Zuohong^{1,2,3},
MA Yong⁵, ZHANG Jianxin², LIU Huazhi^{1,2,3}

(1. Downhole Service Company, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Chengdu Sichuan 610052, China; 2. Sichuan Chuanqing Downhole Technology Co., Ltd, Guanghan Sichuan 618300, China; 3. Oil & Gas Field Applied Chemistry Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Sichuan 610500, China; 4. Chuanxi Drilling Company, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd, Chengdu Sichuan 610066, China; 5. PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu Sichuan 610051, China)

Abstract: To address the challenge of poor cementing quality caused by low filter cake removal efficiency under large-diameter borehole annulus conditions with low return velocity, this study employs a high-temperature, high-pressure dynamic cleaning apparatus to evaluate the effectiveness of active flushing fluid. Experimental investigations focus on three key parameters: mixing ratio, flushing velocity, and formation permeability, with particular emphasis on enhancing slurry strength, improving flushing efficiency, and promoting interfacial bonding strength at the second interface, moreover, scanning electron microscopy analysis was conducted to examine the cement-formation interface after flushing. The results are as follows: (1) the active flushing system achieves over

收稿日期: 2025-02-10; 修回日期: 2025-03-19 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.06.007

基金项目: 中国石油集团重大现场试验项目“川西深部地层安全优快钻完井技术集成研究与试验”(编号2024ZS49); 川庆钻探工程有限公司井下作业公司项目“大套管活性隔前置液体系及配套工艺技术研究”(编号:CQ2024B-15-2-3F)

第一作者: 曾培华, 男, 汉族, 1996年生, 工程师, 化学工程专业, 硕士, 主要从事固井材料与工艺研究工作, 四川省成都市成华区龙潭工业园华盛路46号, zengph_jx@cnpc.com.cn。

引用格式: 曾培华, 严海兵, 刘强, 等. 大尺寸井眼固井活性冲洗液体系作用效能与机理研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(6): 60-66.

ZENG Peihua, YAN Haibing, LIU Qiang, et al. Study on the efficiency and mechanism of the active flushing fluid system for large-size borehole cementing[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(6): 60-66.

100% improvement in slurry strength compared to conventional flushing fluids; (2) with 95% filter cake removal efficiency, the active system shows significantly superior performance compared to water-based and conventional flushing systems; (3) after different velocity simulation, the active flushing fluid achieves over 90% flushing efficiency under low-velocity. The field applications confirm that the active flushing system effectively enhances both slurry strength and secondary interfacial bonding quality, thereby substantially improving cementing quality in large-diameter wells, indicating promising practical potential.

Key words: large-diameter borehole; cementing quality; low return velocity; active flushing fluid; bond strength; super-deep well

0 引言

固井作为钻完井的重要步骤,在维持钻井的持续性、支撑套管、封隔不同层位方面具有重要意义^[1]。固井作业中常使用冲洗液对井眼环空进行处理从而保障固井质量^[2-3]。在冲洗液设计时,主要通过冲洗液紊流对钻井液滤饼动态冲刷,降低钻井液滤饼对水泥浆与地层及套管之间的胶结性能的影响。

随着浅层油气藏开发步入中后期,深层超深层油气藏成为增产上储的主力,工程需求不断扩大^[4-5]。为满足深部地层的钻井需要,井身结构设计时上部井眼的尺寸较常规井偏大。如川渝某科探深井,其表层套管井眼尺寸达到635 mm,是常用508 mm井眼尺寸的1.25倍。大尺寸井眼往往导致冲洗液环空返速低,无法有效冲刷吸附在套管壁和井壁上的钻井液及其滤饼,降低了一二界面的胶结强度^[6-7]。目前大尺寸井眼条件下固井面临以下几个难题:(1)大井眼工程实践少,深井超深井的勘探处在初级阶段,缺少可借鉴的成果^[8-9];(2)受限于设备耐压能力,排量有限,强行达到紊流,面临安全风险^[10-13]。而活性冲洗液技术,通过在常规冲洗液或隔离液体系中加入具有化学活性的矿物粉体,在一定的环境条件激发固化,实现钻井液、水泥浆以及冲洗液三者整体胶结,可有效提高大井眼井固井质量^[14]。

房恩楼等^[15]以具有一定活性的矿物组分为基础,研制了一种密度调节范围宽、满足低温固井要求的可固化隔离液体系LL-CSF,通过对比常规隔离液发现,LL-CSF体系各项性能良好,但耐高温性不足,较适用于低温固井。吴龙飞^[16]研究了一种相容性好、固化能力强的抗污染型可固化隔离液体系,但没有针对低环空返速进行冲洗评价。李早元等^[17]针对江苏油田Z35区块研发了一种由悬浮剂、固化剂及激活剂组成的可固化隔离液体系,可有效

提升混浆强度,但没有对冲洗后的界面胶结强度进行测试。

本文针对深井超深井大尺寸井眼固井难题^[18],基于研发的活性冲洗液体系,通过混浆强度养护、冲洗效率评价、界面胶结强度测试等手段,定量测试了活性冲洗液在提升混浆强度、冲洗效率以及促进二界面胶结强度发展方面的效果,并在川渝地区Φ492.13 mm 的技术套管固井及Φ361.95+368.3 mm 尾管固井进行两井次现场试验,充分论证了活性冲洗液体系在提升大尺寸井眼条件下固井质量方面的有益效果,为未来深井超深井的勘探开发建立了可靠技术储备。

1 实验材料与方法

1.1 实验配方

(1)水泥浆配方为某大尺寸井眼固井水泥浆体系:G级油井水泥+玻璃微珠+微硅+降失水剂+分散剂+柔性剂+增韧剂+缓凝剂+消泡剂+水,密度1.90 g/cm³。

(2)活性冲洗液配方为:活性材料+重晶石+分散剂+缓凝剂+激发剂+消泡剂,密度1.60 g/cm³;常规冲洗液配方为:重晶石+分散剂+缓凝剂+消泡剂,密度1.60 g/cm³。

(3)钻井液配方为某大尺寸井眼完钻所用的有机盐聚合物钻井液体系,密度1.40 g/cm³。

配方及产品均来自于四川川庆井下科技有限公司。

1.2 实验材料

某大尺寸井不同渗透率的露头及人造砂岩岩心如图1所示。

1.3 实验仪器

ZNN-D6型六速旋转黏度计,3060型恒速搅拌器,BSRD-8052G型高温高压稠化仪,HTD1200型常压稠化仪,BSRD-2015D型油井水泥多功能试验

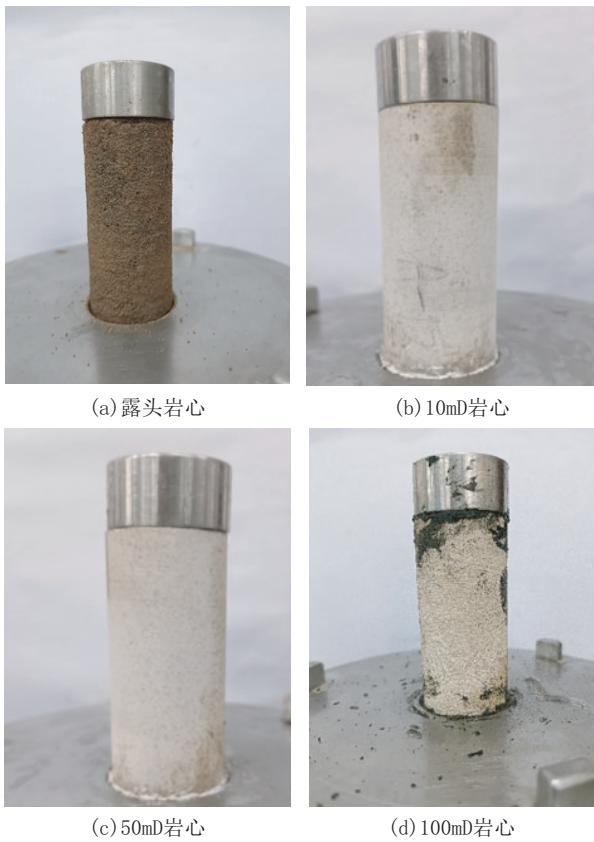


图1 不同渗透率岩心示意

Fig.1 Representation of cores with different permeability

机,FEI Quanta 650 FEG型扫描电镜。

1.4 实验方法

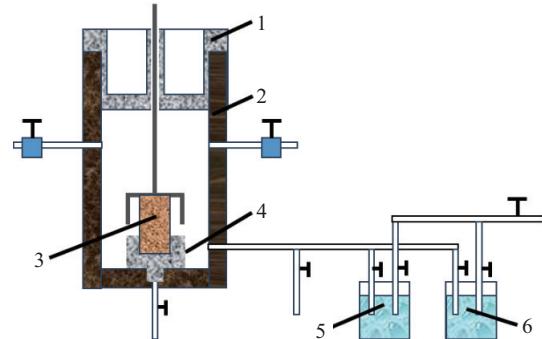
1.4.1 冲洗效率实验方法

目前针对固井冲洗液冲洗效率的评价方法常采用六速黏度计进行评价^[19-20],该方法无法匹配地层原位的高温、高压、高渗条件,模拟结果具有较大误差。因此本文采用如图2所示的高温高压冲洗液动态清洗实验装置对冲洗液冲洗效率进行测试。

具体测试步骤为:(1)测定饱水后的岩心质量,记为 G_1 ;(2)将岩心放入岩心夹持器,模拟井底温度、压力和流速条件在岩心上形成钻井液滤饼后,取出岩心并待表面钻井液充分滴干后,称量吸附钻井液滤饼后的岩心质量,记为 G_2 ;(3)将岩心放回釜内,并把釜内钻井液替换为冲洗液,在模拟井下条件下冲洗一定时间后,取出岩心并滴干表面液体后测定其质量,记为 G_3 ;(4)按照式1计算冲洗效率^[21]:

$$A = \frac{G_2 - G_3}{G_2 - G_1} \quad (1)$$

式中: A —冲洗效率,%; G_1 —饱和岩心质量,g;



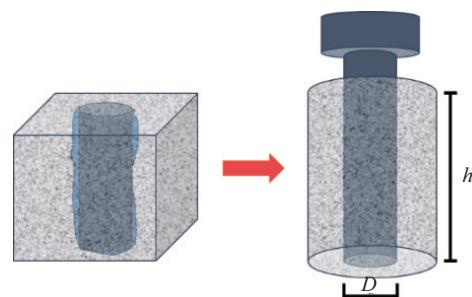
1—釜盖;2—釜体;3—岩心;4—岩心夹持器;5—钻井液储液罐;6—冲洗液储液罐

图2 高温高压冲洗液动态清洗实验装置示意
Fig.2 The experimental device for dynamic cleaning of high-temperature and high-pressure flushing fluid

G_2 —泥饼形成和岩心质量,g; G_3 —冲洗液冲洗泥饼后岩心质量,g。

1.4.2 界面胶结强度实验方法

首先利用图2所示装置对岩心进行造饼和冲洗。将冲洗后的岩心放入到强度养护模具中并灌注水泥浆(图3a)。养护一定时间后固化成型,用压力试验机将岩心从水泥石中压出(图3b)。



(a)胶结强度养护模型 (b)胶结强度测试仪

图3 固井二界面胶结强度测试装置示意

Fig.3 Cementing strength testing device at the second interface of cementing

胶结强度的计算方法如下^[22]:

$$P_{\text{胶}} = \frac{10F}{\pi Dh} \quad (2)$$

式中: P —二界面胶结强度,MPa; F —测得的力,kN; D —岩心直径,cm; h —岩心长度,cm。

2 实验结果与讨论

2.1 不同比例混浆强度

表1给出了水泥浆与常规冲洗液及活性冲洗液

在不同混浆比例下的抗压强度情况。可以看出,随着冲洗液占比的增加,两种冲洗液体系的抗压强度均呈现不同程度的下降。在相同混浆比例下,活性冲洗液混浆的抗压强度均高于常规冲洗液混浆的抗压强度,这是由于其中所含的活性颗粒,可在水泥浆碱性激发下发生胶凝固化。

表1 不同比例混浆抗压强度情况

Table 1 Compressive strength of mixed slurry in different proportions

水泥浆:常规冲洗液70℃活性冲洗液70℃活性冲洗液	冲洗液:水浴养护48h抗压强度/MPa	冲洗液:水浴养护48h抗压强度/MPa	抗压强度提高率/%
(体积比)			
100:0	21.6	21.6	0
90:10	10.7	20.8	94
70:30	5.4	13.6	152
50:50	2.6	7.6	192

2.2 冲洗效率及胶结强度

2.2.1 冲洗液类型对冲洗效率影响

为了定量评价不同类型冲洗液对冲洗效率的影响,分别选择清水、常规冲洗液体系、活性冲洗液体系对冲洗效率进行了对比评价,冲洗参数为:冲洗速度200 r/min \approx 0.43 m/s^[20],冲洗时长15 min,结果如表2和图4所示。

表2 不同冲洗液类型冲洗形貌

Table 2 Flushing topography using different types of flushing fluid

类型	清水	常规冲洗液体系	活性冲洗液体系
冲洗前形貌			
			
冲洗后形貌			
			

目前评价冲洗效率的方法中,使用的冲洗速度为200或300 r/min,冲洗时长为5~10 min^[20]。因大尺寸井眼环空返速更低,在相同行程下的冲洗时间

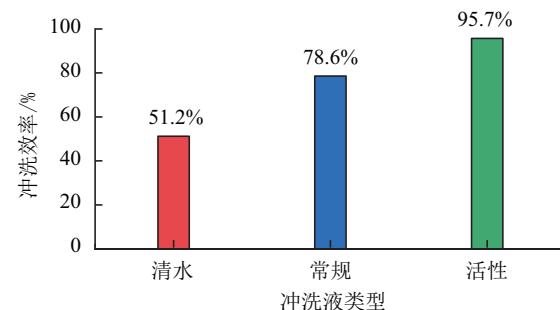


图4 不同类型冲洗液冲洗效率

Fig.4 Flushing efficiency of different types of flushing fluids

较常规井眼长,因此选择使用较低返速为200 r/min冲洗速度对露头岩心冲洗15 min计算冲洗效率。

通过表2可以看出,不同类型的冲洗液冲洗效率相差较大。经清水冲洗后,岩心表面仍滞留较多、较厚的钻井液泥饼。常规冲洗液体系冲洗后的岩心表面所吸附的泥饼量有较大的减少,但有少量密实的泥饼吸附。相比于其他两种冲洗条件,经过活性冲洗液体系冲洗后的岩心表面,几乎观察不到钻井液泥饼的吸附的情况。

通过图4可以看出,活性冲洗液体系的冲洗效率最高,达到了95.7%,大于常规冲洗液和清水,与冲洗形貌具有一致性,表明活性冲洗液体系具有良好的界面清洗能力。

2.2.2 渗透率对冲洗效率及胶结强度影响

通过对不同渗透率的人造岩心及目标区块岩心露头进行冲洗效率及胶结强度实验发现(表3):随着渗透率的不断增大,常规冲洗液体系及活性冲洗液体系的冲洗效率及胶结强度均有不同程度的增加,且活性冲洗液的冲洗效率及胶结强度均大于常规冲洗液。

如图5所示,分析认为,由于在较低渗透率的情况下岩心孔隙较小,压差造成的钻井液中的固相颗粒可能镶嵌在孔隙中,内应力较大,较难进行有效冲洗。而随着渗透率不断增加,岩心孔隙较大,钻井液颗粒在岩心孔隙中排列较为松散,内应力较小,在冲刷过程中可有效清除钻井液的固相颗粒。

2.2.3 流速对冲洗效率及胶结强度影响

大尺寸井眼环空较大,环空返速较低,较难实现固井二界面的有效冲洗^[22]。为了定量评价不同冲洗液在较低返速下的冲洗效果,选择冲洗速度为0.1、0.25、0.35、0.47、0.55 m/s对露头岩心进行冲洗

表3 不同渗透率岩心冲洗效率及胶结强度

Table 3 Flushing efficiency and cementation strength of cores with different permeability

渗透率/mD	冲洗速度/(m·s ⁻¹)	养护条件	常规冲洗液		活性冲洗液	
			冲洗效率/%	胶结强度/MPa	冲洗效率/%	胶结强度/MPa
露头			76.3	1.22	87.7	1.68
10	0.43	21 MPa×	73.1	1.15	90.2	1.51
50		70 °C×48 h	83.2	1.41	94.3	1.72
100			85.6	1.57	97.2	1.88

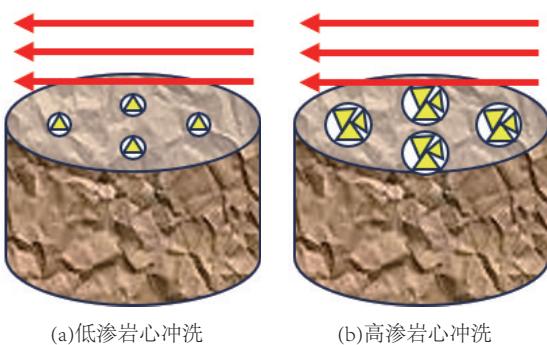


图5 不同渗透率下冲洗液冲洗情况示意

Fig.5 Flushing solution under different permeability

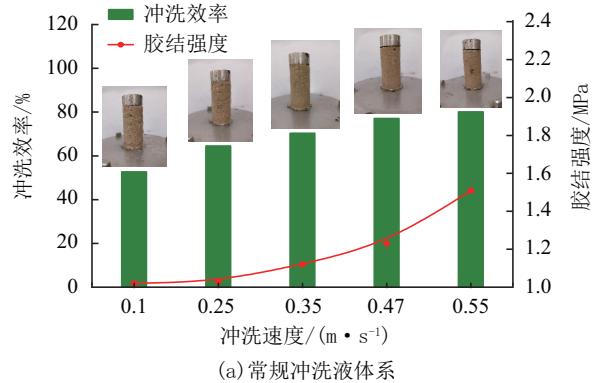
实验(见表4)。

表4 露头岩心不同冲洗速度下冲洗效率及胶结强度

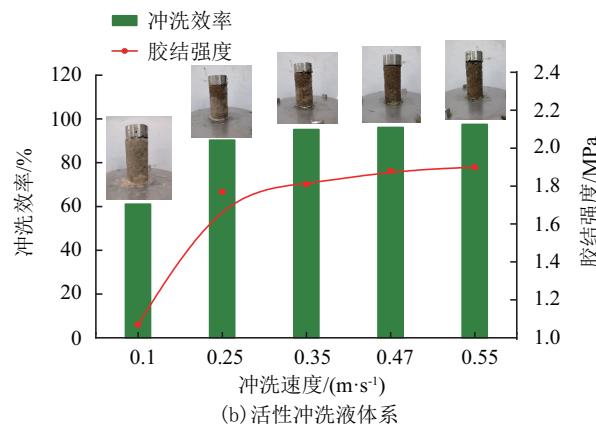
Table 4 Flushing efficiency and cementation strength of outcrop core at different flushing speeds

冲洗速度/(m·s ⁻¹)	常规冲洗液		活性冲洗液	
	冲洗效率/%	胶结强度/MPa	冲洗效率/%	胶结强度/MPa
0.1	52.7	1.02	61.1	1.07
0.25	64.5	1.03	90.3	1.77
0.35	70.3	1.12	95.2	1.81
0.47	77.1	1.23	96.1	1.85
0.55	80.1	1.51	97.5	1.90

图6为在不同冲洗速度下,活性冲洗液和常规冲洗液在冲洗效率及胶结强度变化趋势。可以看出,随着冲洗速度的不断增加,两种冲洗液体系的冲洗效率及胶结强度均有不同程度的增加。而活性冲洗液在0.25 m/s的冲洗速率下的冲洗效率>90%,这说明活性冲洗液体系在较低返速下也具有良好冲洗能力。对胶结强度的分析可以看出,在相同冲洗速度的情况下,活性冲洗液的胶结强度均大于常规冲洗液的胶结强度。因此,活性冲洗液体系更适用于大尺寸井眼环空低返速的固井。



(a) 常规冲洗液体系



(b) 活性冲洗液体系

图6 不同冲洗速度下冲洗液冲洗效率及胶结强度

Fig.6 Flushing efficiency and cementation strength of rinsing solution at different flushing speeds

2.3 二界面微观结构分析

对不同冲洗液体系冲洗后的二界面进行扫描电镜分析,结果如图7所示。可以看出,由活性冲洗液冲洗后的二界面微观结构致密,无明显孔洞,整体呈片状堆砌;而由常规冲洗液冲洗后的被大量絮状结构覆盖,呈现绒毛状,结构松散,存在较多的孔洞缝隙。说明经活性冲洗液体系冲洗后可有效促进固井二界面胶结强度发展。

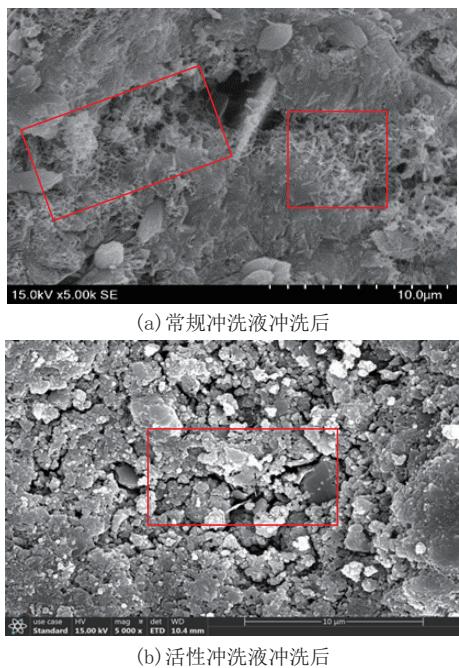


图7 不同冲洗液体系二界面SEM照片
Fig.7 SEM snapshots of the two interfaces of flushing fluid systems

3 现场应用

目前该活性冲洗液体系已在川渝地区某大尺寸套管固井中的 $\varnothing 492.13\text{ mm}$ 的技术套管固井及 $\varnothing 361.95+368.3\text{ mm}$ 尾管固井进行两次现场应用。两次固井施工前的电测显示,大尺寸井眼存在大肚子井段,软件模拟表明,固井施工过程中存在水泥浆顶替效率低,混浆量超大,混浆段超长等难题。因此,在浆柱结构设计时,在水泥浆段前引入了活性冲洗液体系,通过活性冲洗液体系与水泥浆及钻井液之间发生固化反应,促进固井二界面胶结强度的增加及混浆段的强度发育,固井质量。

现场大样复核试验结果显示:(1)在加重至 1.85 g/cm^3 后,活性冲洗液体系的稳定性与流变性均良好,流变指数 $n>0.8$,稠度系数 $k<0.3$,可达到较佳的冲洗效率;(2)如表5所示,不同比例的该活性冲洗液体系与水泥浆混浆按照井底温度 $125\text{ }^\circ\text{C}\times 140\text{ MPa}$ 过稠化,并在 $82\text{ }^\circ\text{C}\times 21\text{ MPa}$ 进行养护后,混浆均具有良好的强度,能够保证顶替不良井段的固井质量。此外,由于活性冲洗液混浆能够形成强度,还可明显减少现场混浆排放量,充分提高混浆利用率,极大减轻现场环保压力。

电测结果显示,该大尺寸套管固井的第一次现

表5 不同比例混浆强度数据

Table 5 Mixing intensity data of different ratios

水泥浆:活性冲洗液(体积比)	平均抗压强度/MPa
100:0	29.01
90:10	24.09
70:30	26.77
50:50	26.25
30:70	16.73

场施工的质量整体优质率达91.7%,合格率达98.4%,第二次尾管固井现场施工的质量整体优质率88.1%,合格率达99.9%,均在模拟的固井质量的结果上有大幅提升,充分说明了活性冲洗液体系的加入对大尺寸井眼固井质量的提升具有重要作用。

4 结论及建议

(1)利用高温高压动态冲洗装置,对比了活性冲洗液、常规冲洗液与水泥浆在混浆强度、冲洗效率以及胶结强度等方面性能,发现活性冲洗液整体性能均优于常规冲洗液体系。

(2)活性冲洗液在 0.25 m/s 的冲洗速率下冲洗效率达90%以上,胶结强度较常规冲洗液有明显提升,且二界面的微观结构更稳定,表明活性冲洗液在大尺寸环空低返速条件下更具备适应性。

(3)针对川渝地区大尺寸井固井后的质量分析发现,活性冲洗液在流变参数及混浆强度数据表现优异,平均固井优质率 $>88\%$,合格率 $>98\%$,充分验证了活性冲洗液在大尺寸井眼的适用性。

(4)为进一步提升活性冲洗液的混浆强度与冲洗效率,可对活性矿物进行复配或改性接枝,如与高硬度或强润湿材料复合,拓宽其应用场景及效果。

参考文献(References):

- [1] 张明昌.固井工艺技术[M].北京:中国石化出版社,2007.
ZHANG Mingchang. Cementing Technology[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2007.
- [2] 杨香艳,郭小阳,杨远光,等.固井前置冲洗液的研究发展[J].西南石油学院学报,2005,27(1):70-74.
YANG Xiangyan, GUO Xiaoyang, YANG Yuanguang, et al. The research and development of the well cementation preposition flushing fluid[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2005,27(1):70-74.
- [3] 李早元,杨绪华,郭小阳,等.固井前钻井液地面调整及前置液紊流低返速顶替固井技术[J].天然气工业,2005,25(1):93-95.
LI Zaoyuan, YANG Xuhua, GUO Xiaoyang, et al. Cementing

- techniques of ground adjusting drilling fluid properties before cementing and displacing mud by turbulent pre-flush at low return velocity[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(1):93-95.
- [4] 孙龙德,邹才能,朱如凯,等.中国深层油气形成、分布与潜力分析[J].*石油勘探与开发*,2013,40(6):641-649.
SUN Longde, ZOU Caimeng, ZHU Rukai, et al. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(6):641-649.
- [5] 汪海阁,葛云华,石林.深井超深井钻完井技术现状、挑战和“十三五”发展方向[J].*天然气工业*,2017,37(4):1-8.
WANG Haige, GE Yunhua, SHI Lin. Technologies in deep and ultra-deep well drilling: Present status, challenges and future trend in the 13th five-year plan period (2016-2020)[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(4):1-8.
- [6] 蒋记伟,李军,柳贡慧,等.基于 Cohesive 单元法的弃置井水泥塞-套管界面胶结失效数值模拟[J].*钻井液与完井液*,2020,37(3):351-357.
JIANG Jiwei, LI Jun, LIU Gonghui, et al. Numerical simulation of failed bonding between cement plug and casing string in abandoned wells based on cohesive element method[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(3):351-357.
- [7] 何瑀婷,赵殊勋,高启轩,等.镶嵌屏蔽钻井液滤饼对固井二界面胶结质量的影响与提高措施[J].*钻井液与完井液*,2022,39(2):227-233.
HE Yuting, ZHAO Shuxun, GAO Qixuan, et al. Influence of mosaic shielding drilling fluid filter cake on the cementing quality of second interface and improvement method [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2022, 39(2):227-233.
- [8] 邓虎,贾利春.四川盆地深井超深井钻井关键技术与展望[J].*天然气工业*,2022,42(12):82-94.
DENG Hu, JIA Lichun. Key technologies for drilling deep and ultra-deep wells in the Sichuan Basin: Current status, challenges and prospects[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(12):82-94.
- [9] 汪海阁,黄洪春,纪国栋,等.中国石油深井、超深井和水平井钻完井技术进展与挑战[J].*中国石油勘探*,2023,28(3):1-11.
WANG Haige, HUANG Hongchun, JI Guodong, et al. Progress and challenges of drilling and completion technologies for deep, ultra-deep and horizontal wells of CNPC[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(3):1-11.
- [10] 钟福海,何树华,高飞,等.阳探1井循环高泵压条件下的固井技术[J].*钻井液与完井液*,2015,32(5):98-100.
ZHONG Fuhai, HE Shuhua, GAO Fei, et al. Well cementing technology for well Yangtan-1 with high circulation pressure [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2015, 32(5):98-100.
- [11] 邹书强,张红卫,伊尔齐木,等.顺北一区超深井窄间隙小尾管固井技术研究[J].*石油钻探技术*,2019,47(6):60-66.
ZOU Shuqiang, ZHANG Hongwei, Yierqimu, et al. Slim liner cementing technology for ultra-deep wells with a narrow annulus in No.1 district of Shunbei Block[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(6):60-66.
- [12] 肖伟,罗宇维,赵军,等.海上窄压力窗口控压固井浆柱结构设计方法[J].*钻探工程*,2024,51(1):58-67.
XIAO Wei, LUO Yuwei, ZHAO Jun, et al. Design method of slurry column structure of managed pressure cementing at off-shore gas wells with narrow pressure window[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(1):58-67.
- [13] 闵江本,向蓉,陈博.长庆油田小套管二次固井工艺技术研究与应用[J].*钻探工程*,2021,48(8):26-32.
MIN Jiangben, XIANG Rong, CHEN Bo. Research and application of secondary cementing technology for slim casing in Changqing Oilfield[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(8):26-32.
- [14] 陈二丁,王成文,孟仁洲.一种高效清除井壁滤饼的新型固井冲洗液[J].*天然气工业*,2015,35(8):69-74.
CHEN Erding, WANG Chengwen, MENG Rengzhou. A new cementation flushing fluid for efficiently removing wellbore filter cake[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(8):69-74.
- [15] 房恩楼,李浩然,张浩,等.一种低温低密度可固化隔离液的研制与性能评价[J].*钻井液与完井液*,2020,37(1):86-92.
FANG Enlou, LI Haoran, ZHANG Hao, et al. Development and performance evaluation of a low temperature low density solidifiable spacer fluid[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(1):86-92.
- [16] 吴龙飞.可固化隔离液技术研究与应用[D].成都:西南石油大学,2016.
WU Longfei. Development and application of curable spacer fluids[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [17] 李早元,吴龙飞,张兴国,等.Z35区块调整井可固化隔离液技术研究与应用[J].*石油钻采工艺*,2016,38(5):606-611.
LI Zaoyuan, WU Longfei, ZHANG Xingguo, et al. Development and application of curable spacer fluids for adjusting wells in Block Z35[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2016, 38(5):606-611.
- [18] 吴华,刘连恺,王磊,等.GY5-1-4H页岩油水平井提高固井质量关键技术研究与实践[J].*钻探工程*,2023,50(4):135-141.
WU Hua, LIU Liankai, WANG Lei, et al. Study and application of key technology enhancement of shale oil horizontal well cementing quality for Well GY5-1-4H[J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(4):135-141.
- [19] Curbelo F D S, Garnica A I C, Araújo E A, et al. Vegetable oil-based preflush fluid in well cementing[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 170:392-399.
- [20] 辜涛,郑有成,郑友志,等.固井前置液冲洗效率评价方法-改进的旋转黏度计法[J].*天然气工业*,2020,40(11):120-126.
GU Tao, ZHENG Youcheng, ZHENG Youzhi, et al. A method for evaluating the flushing efficiency of cementing preflush: An improved rotary viscometer method[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(11):120-126.
- [21] 何立成.油气井固井多棱石英砂冲洗液的研制与现场应用[J].*石油钻探技术*,2022,50(3):46-50.
HE Licheng. Research on a polygonal quartz sand flushing fluid for cementing oil and gas wells and its field application[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(3):46-50.
- [22] Kremieniewski M, Błaż S, Stryczek S, et al. Effect of cleaning the annular space on the adhesion of the cement sheath to the rock[J]. *Energies*, 2021, 14(16):5187.