

高密度低摩阻水泥浆体系在高石梯区块的应用

张伟, 杨旺*, 赵启阳, 罗阳利, 李伟

(中国石油川庆钻探工程有限公司井下作业公司, 四川 成都 610051)

摘要:高石梯区块在 $\Phi 177.8$ mm尾管固井过程中面临油气显示活跃、施工泵压高、安全密度窗口窄、易漏失、井筒温差大等难题,对水泥浆体系的密度调控、流变性和稳定性提出了较高要求。为提升高密度水泥浆性能,通过优选微锰球形材料与铁矿粉复配作为加重剂,并结合低黏降失水剂与高分子悬浮稳定剂,开发出一种密度可调($2.1\sim 2.4$ g/cm³)的高密度低摩阻水泥浆体系。该体系具备优异的高温稳定性与泵送流动性,可有效降低摩阻并提升环空顶替效率。在区块内4口井的应用结果表明:施工泵压降低4~6 MPa,环空顶替效率提升至90%以上,固井质量合格率超过70%,水泥浆返至设计井深且全井段无漏失。理论摩阻压力计算值与实测数据高度吻合,验证了该体系的适应性及工程可行性,为其在高石梯区块的推广应用提供了有力支撑。

关键词:高密度;低摩阻;水泥浆体系;固井质量;顶替效率;高石梯区块

中图分类号:TE256;P634 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2025)S1-0319-06

Application of high-density and low-friction cement slurry system in the Gaoshiti Block

ZHANG Wei, YANG Wang*, ZHAO Qiyang, LUO Yangli, LI Wei

(Downhole Operation Company of CNPC Chuangqing Drilling Engineering Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610051, China)

Abstract: The Gaoshiti Block faces multiple challenges during the cementing of $\Phi 177.8$ mm liners, including active oil and gas shows, high pumping pressure, a narrow window of safe density, susceptibility to lost circulation, and significant wellbore temperature variations. These conditions impose strict requirements on the density control, rheology, and stability of the cement slurry. To enhance the performance of high-density cement slurry, a high-density, low-friction system with an adjustable density ($2.1\sim 2.4$ g/cm³) was developed. This was achieved by optimizing a compound weighting agent consisting of micromanganese spherical particles and iron ore powder, in combination with a low-viscosity fluid-loss additive and a polymer suspension stabilizer. The system demonstrates excellent high-temperature stability and pumpability, effectively reducing friction and improving annular displacement efficiency. Field applications in four wells within the block showed a reduction in pumping pressure by 4~6MPa, an increase in annular displacement efficiency to over 90%, a cementing qualification rate exceeding 70%, full returns to the planned depth, and no fluid losses across the entire interval. The theoretical friction pressure closely matches field measurements, confirming the system's adaptability and engineering feasibility, and providing strong support for its broader application in the Gaoshiti Block.

Key words: high density; low friction; cement slurry system; cementing quality; substitution efficiency; the Gaoshiti Block

收稿日期:2025-06-13; 修回日期:2025-09-05 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.S1.051

基金项目: 中国石油青年科技专项“川渝高压气井水泥环全生命周期密封失效机理及控制机制研究”(编号:2024DQ03072); 中国石油集团公司川庆钻探工程有限公司-西南石油大学工程技术联合研究科技项目“高压气井尾管固井界面密封技术研究”(编号:CQXN-2023-12)

第一作者: 张伟, 男, 汉族, 1983生, 工程师, 应用化学专业, 主要从事固井外加剂产品研发、水泥浆研究和现场技术服务工作, 四川省广汉市三水镇高店村井下科技有限公司(618300), zhangwei_jx@cnpc.com.cn。

通信作者: 杨旺, 男, 汉族, 2001生, 助理工程师, 材料科学与工程专业, 硕士, 主要从事固井外加剂产品研发、水泥浆研究和现场技术服务工作, 四川省广汉市三水镇高店村井下科技有限公司(618300), yangw2024_jx@cnpc.com.cn。

引用格式: 张伟, 杨旺, 赵启阳, 等. 高密度低摩阻水泥浆体系在高石梯区块的应用[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 319-324.

ZHANG Wei, YANG Wang, ZHAO Qiyang, et al. Application of high-density and low-friction cement slurry system in the Gaoshiti Block[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 319-324.

0 引言

随着油气勘探开发逐步向深层、高温高压及非均质复杂地层拓展,钻井作业中频繁钻遇高压油气层。为平衡地层压力、保障施工安全,使用高密度或超高密度水泥浆成为必要手段。然而,此类水泥浆存在摩阻大、流动性差、沉降稳定性不足等问题,易引发泵送困难与井漏风险,严重影响固井质量。降低高密度水泥浆摩阻,可显著改善其在井筒内的流动性能,提高注入效率,缩短作业时间,对提升固井质量意义重大^[1]。

国内多个研究团队围绕高密度水泥浆体系优化开展研究。李光辉^[2]基于颗粒级配理论,筛选加重材料构建高密度水泥浆体系;林荣壮等^[3]通过筛选抗高温外加剂与加重材料,设计出抗高温高密度防窜水泥浆;付雄涛等^[4]引入次纳米级硅材料,提出适用于长水平段施工的低摩阻水泥浆体系。这些成果为复杂井况下的水泥浆设计奠定了理论与工程基础。但当前,高密度低摩阻水泥浆在稳定性控制、泵送流变性能及早期强度提升方面仍存在技术挑战,在深井作业中仍需进一步完善。

西南油气田高石梯区块作为500亿m³天然气主力产区,主目的层埋深约5400 m,Ø177.8 mm尾管下深达5200 m,裸眼长度超2000 m,固井作业面临高温、高压(压力系数2.1~2.4)及窄密度窗口(0.14~0.2 g/cm³)等挑战。前期固井作业中采用的常规高密度水泥浆由于固相含量高、摩阻大,经常导致地层漏失,影响施工。针对该问题所研发的高密度低摩阻水泥浆体系,在本区块4口井的应用中固井作业无漏失风险,具有超过70%的固井质量合格率,为该地区规模化应用提供了可靠的技术支持。

1 主要技术难点及技术措施

在稠浆固井作业中,主要面临以下技术难点:(1)环空间隙小、顶替效率低,因井眼规则且扩大率低致环空狭窄,加之井斜角大、套管居中度差,严重影响钻井液顶替效率^[5];(2)安全密度窗口窄、易漏失,多层异常高压层系导致密度窗口极小甚至消失,水泥浆与钻井液密度差仅约0.05 g/cm³,施工中易发生漏失或井涌^[6];(3)高密度有机盐聚磺钻井液与水泥浆相容性差,界面发生窜混,胶结质量显著下降^[7];(4)高密度水泥浆液相摩阻高,限制施工泵压与排量,加剧顶替困难,停泵时易引

发漏失或窜流,影响水泥环完整性^[8]。

针对上述问题,尤其在安全密度窗口极窄和泵压受限的条件下,常规高密度水泥浆难以满足要求。其高摩阻特性严重制约施工排量,增加漏失与窜混风险。因此,开发及应用高密度低摩阻水泥浆体系成为关键。该体系通过降低流动摩阻,可扩展施工泵压窗口,实现在安全泵压下采用大排量顶替,结合改善套管居中,有效提升钻井液顶替效率。同时,低摩阻与高可控排量有助于维持压力平衡,减少停泵扰动,降低漏失及流体互窜概率,从而改善顶替效率、减少混浆,最终形成完整且胶结质量优良的水泥环。

2 高密度低摩阻水泥浆体系配伍

2.1 加重剂的优选

在稠浆设计中,加重剂的选择对浆体性能至关重要。常用材料包括重晶石、钛铁矿、磁铁矿、赤铁矿等^[9]。理想的加重剂需满足:(1)粒度分布匹配水泥;(2)低需水量;(3)不影响水泥水化进程,与外加剂相容性好,对外加剂吸附弱^[10]。由于紧密堆积理论需要多级粒径优化填充,而传统铁矿粉(如磁铁矿、赤铁矿)因其不规则形状和相对较大粒径,难以通过单一材料实现高密度水泥浆所需的流动性、稳定性与高强度的平衡^[11-12]。

为克服上述局限,优选球形微锰粉与铁矿粉复配体系。通过粒径互补:微锰粉粒径细小,可有效填充水泥颗粒、硅粉及铁矿粉之间的空隙,实现更紧密的颗粒级配。“滚珠效应”降低摩阻:微锰的球形形态在浆体中发挥润滑作用,显著降低流动摩阻,改善流变性。提升综合性能:该复配体系在保证目标密度的前提下,降低需水量约5~10%^[13],增强沉降稳定性,并最终贡献于水泥石强度。

2.2 悬浮剂的选择

选择悬浮剂时需着重考虑水泥浆的流变性能,水泥浆不仅需要良好的沉降稳定性还要有很好的流变性能。进行水泥浆设计时,为提高水泥浆的稳定性主要从两个方面着手:(1)固体颗粒材料的颗粒级配理论,水泥浆中加入合适微颗粒材料,提高水泥浆的黏度;(2)适当的聚合物加量,聚合物加量能够在保证水泥浆具有良好流变与悬浮性能^[13-14]。

通过表1中试验评价结果得到第3种悬浮剂更符合要求。该类悬浮剂为水溶性高分子聚合物类型,分

子链上含有疏水基团,在常温下不会增加水泥浆的黏度,随着温度的升高逐渐溶解水化在高温下会发生疏水缔合作用,不断的增加体系黏度,运动时对水泥浆剪切力较小,静止后水泥浆很快处于胶凝状态,增加了该体系静切力从而达到悬浮作用。

表 1 悬浮剂评价结果

序号	加量/%	Ø600	Ø300	Ø200	Ø100	Ø6	Ø3	<i>n</i>	<i>K</i>	上下密度差/(g·cm ⁻³)
1	0.2	—	238	164	87	7	5	1.039	0.094	0.13
	0.4	—	—	249	144	16	10	—	—	0.06
	0.6	—	—	—	215	18	14	—	—	0.02
2	0.2	268	142	102	52	3	2	0.916	0.236	0.17
	0.4	—	262	184	101	8	5	0.947	0.196	0.09
	0.6	—	—	264	147	13	7	—	—	0.04
3	0.2	253	139	95	51	5	3	0.838	0.374	0.15
	0.4	—	238	175	95	9	5	0.841	0.649	0.06
	0.6	—	275	204	114	11	6	0.789	1.015	0.02

注:配方组成为水泥+铁矿粉+微锰+石英砂+缓凝剂+降失水剂+减阻剂,密度 2.25 g/cm³。

2.3 降失水剂的优选

降失水剂主要有固体颗粒材料和水溶性高分子聚合物,针对高石梯区块固井特点选择水溶性高分子聚合物的产品做评价。

传统高分子聚合物降失水剂通常具有较高的分子量,主要通过长链分子的物理堵塞和增黏效应降低滤失量,但会显著增加水泥浆的黏度,影响其流变性能。相比之下,低黏降失水剂采用短支链或梳状分子结构设计,分子量较低,并通过优化亲水基团(—SO₃)的分布,减少分子链缠结,从而在保证降滤失效果的同时,避免对水泥浆黏度的不利影响。根据表 2 数据,对比不同降失水剂产品对水泥浆性能的影响可以看出,3 种产品六速读数都可测,API 滤失量可控,其中 2 号产品滤失量更低,同时其流变参数(*n* 值更大、*K* 值更小),表明水泥浆具有更好的剪切稀释特性,有利于提高顶替效率。

表 2 降失水剂的评价

序号	Ø600	Ø300	Ø200	Ø100	Ø6	Ø3	<i>n</i>	<i>K</i>	API 滤失量/mL
1	—	259	181	105	18	7	0.735	1.303	64
2	252	148	101	52	4	2	0.919	0.236	48
3	292	175	132	76	9	6	0.743	0.996	54
4	284	167	118	64	8	5	0.764	0.705	58

注:配方组成为水泥+3% 降失水剂,密度 1.90 g/cm³。

3 高密度低摩阻水泥浆体系性能评价

通过大量的室内实验,以铁矿粉和微锰为主要加重材料,加入微硅进行颗粒级配,优选出水溶性高分子聚合物降失水剂和悬浮剂及大温差缓凝剂和聚羧酸减阻剂组成高密度低摩阻水泥浆体系。通过改变加重材料和水泥的比例,形成了 2.1~2.4 g/cm³ 的高密度低摩阻水泥浆体系。

3.1 流变性能和稳定性评价

浆体的稳定性是密度水泥浆性能最重要的指标之一^[14-15],而浆体的稳定性能影响水泥浆的失水、稠化时间及水泥石强度和施工时的流动摩阻。流变性能是评价水泥浆摩阻的重要参数^[16]。

从表 3 可以看出,相较于普通高密度水泥浆,高密度低摩阻体系在不同密度下水泥浆上下密度差较小,高温下稳定性好,同时 *n* 值>0.8, *K* 值<0.5,说明水泥浆流变性较好,水泥浆摩阻较低。

表 3 不同密度条件下水泥浆的稳定性和流变性能

水泥浆体系	密度/(g·cm ⁻³)	Ø300	Ø200	Ø100	Ø6	Ø3	<i>n</i>	<i>K</i>	密度差/(g·cm ⁻³)
低	2.1	210	108	79	10	6	0.89	0.42	0.01
摩	2.2	245	123	85	11	7	0.92	0.45	0.02
阻	2.4	282	198	103	13	8	0.91	0.47	0.03
常规	2.2	252	163	102	16	8	0.74	0.65	0.04

注:实验试验条件 120 ℃、100 MPa、70 min 后降温到 90 ℃测上下密度差。

3.2 低摩阻水泥浆体系综合性能评价

室内对低摩阻水泥浆体系和常规高密度水泥体系的流动度、抗压强度、游离液、滤失量等进行测试,对比两种水泥浆体系的差异。

从表4可以看出,低摩阻水泥浆整体性能优于常规水泥浆性能,颗粒级配后水泥浆流动度、强度

比常规的要高、滤失量相比要低。低摩阻水泥浆体系稠化停机30 min后再开机,稠度值增长10 Bc,说明浆体触变性不强,在施工中停泵后再开泵后泵压不会增加,减少井漏风险。同时从 n 、 K 值也可以看出,低摩阻水泥浆体系流变性更好,有利于施工时泵压的降低。

表4 不同体系高密度水泥浆综合性能

水泥浆体系	密度/(g·cm ⁻³)	流动度/cm	API滤失量/mL	48 h强度/MPa	密度差/(g·cm ⁻³)	停机后稠度变化/Bc	n	K
低摩阻	2.20	23	46	20.5	0.01	10	0.92	0.45
常规	2.20	21	56	13	0.04	25	0.74	0.65

注:低摩阻水泥是铁矿粉和微锰加重,常规只是铁矿粉加重。

3.3 水泥浆体系摩阻与表观黏度特性分析

为量化水泥浆在固井施工过程中的摩阻特性,本文基于前述实验获得的流变参数(参见表3),采用幂律模型对表观黏度与剪切速率之间的关系进行计算。幂律模型可较好地描述非牛顿流体在不同剪切条件下的黏度变化,其基本形式如下:

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

式中: η ——表观黏度,Pa·s; K ——稠度系数,Pa·s ^{n} ; n ——流变指数(无量纲); $\dot{\gamma}$ ——剪切速率,s⁻¹。

本文选取50~300 s⁻¹作为固井泵送过程中的剪切速率区间,分别代入常规与低摩阻水泥浆体系的流变参数,计算得到各自的表观黏度变化曲线。计算结果如图1所示,低摩阻体系在全剪切速率范围内均表现出更低的表观黏度,且随剪切速率的增加黏度下降更为迅速,表征出更强的剪切稀化能力,这意味着该体系在实际固井泵送过程中具有更小的摩阻,更利于实现高排量、低压差的安全注替,特别适用于窄压力窗口井段。

3.4 顶替效率模拟测试

基于实验测得的流变参数,本研究采用Fluent软件建立了井筒固井流动数值模型。模型以177.8

mm套管为研究对象,考虑了壁厚影响,并采用VOF多相流模型来捕捉相界面的动态演化过程。为提升计算效率,采用分段模拟方法进行求解。边界条件设置如下:入口速度为环空注替速度,注入流体为水泥浆;初始条件设定为钻井液体积分数为1,水泥浆体积分数为0;出口采用压力出口边界条件(Gauge Pressure=0)。井壁与套管壁均设置为无滑移壁面条件,并施加竖直向下的重力加速度(9.81 m/s²)。计算时间步长设定为0.001 s,以保证数值模拟的稳定性。

在模拟过程中,输入钻井液密度及表4中的两种水泥浆流变参数(低摩阻水泥浆与常规水泥浆),分别进行顶替效率的数值模拟分析。为准确评估水泥浆流变性能的影响,研究保持相同的井筒结构、排量及初始钻井液条件,仅改变水泥浆的流变参数,通过对比模拟结果,揭示不同水泥浆体系的顶替效率。

计算结果如图2所示,低摩阻水泥浆体系在相同工况下的顶替效率为93.6%,显著高于常规水泥浆体系的88.9%。这表明,优化水泥浆的流动性和剪切稀化能力,不仅可降低泵送摩阻,还能有效提升环空置换效果,减少残留泥浆带,提高水泥环的封隔完整性。同时,由于低摩阻水泥浆体系在泵送过程中所产生的压降较小,更适用于安全密度窗口较窄的复杂井段。在不突破地层承压极限的前提下,可适当提升排量,以增强水泥浆冲刷能力,从而进一步提升环空顶替效率与封固质量。这一优势使得低摩阻体系在深井、高温、高压及易漏地层中具备更高的工程适应性和推广潜力。

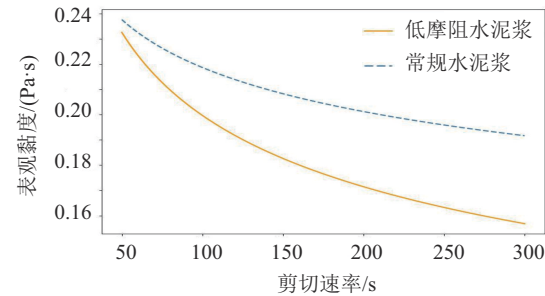
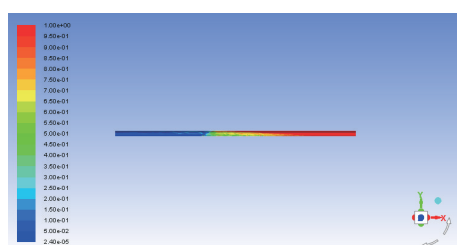
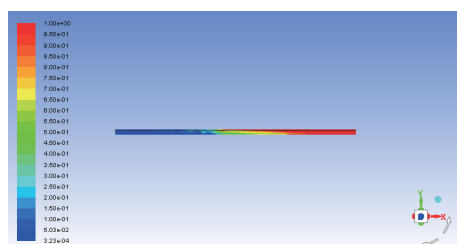


图1 不同水泥浆体系表观黏度变化趋势



(a) 低摩阻水泥浆体系



(b) 常规水泥浆体系顶替效果

图2 顶替效率模拟

4 现场应用

通过前期实验得到了密度为 $2.1\sim 2.4\text{ g/cm}^3$ 的基础低摩阻配方,在实际应用时,根据工程要求对其外加剂进行微调,改变缓凝剂、增稠剂等影响水泥稠化时间和水泥石性能的外加剂掺量,获得使用性能满足工程需求,同时摩阻低的高密度固井水泥浆。

4.1 GS001-H58井

GS001-H58井是安岳气田高石梯区块灯四顶界构造高石7井区东部构造翼部的一口开发井,本开中完井深 5415.00 m (垂深 5087.75 m),下入 $\varnothing 177.8\text{ mm}$ 尾管进行悬挂固井(套管下深 $2923.75\sim 5415.00\text{ m}$),封固上部高压气层,为下开次安全钻进创造条件。

本开钻进期间共计15个显示,气层显示活跃,

后期候凝过程中窜气风险大,要求水泥浆具有良好的防窜性能;裸眼段长(2491.25 m),温差大($60\text{ }^{\circ}\text{C}$),要求具有抗高温防强度衰退、封固段顶部强度发展快等性能,满足施工安全和封固要求。固井施工安全密度窗口范围在 $2.20\sim 2.37\text{ g/cm}^3$ 之间,设计采用两凝体系,两凝界面 3600 m ,缓凝水泥浆密度 2.35 g/cm^3 ,快干水泥浆密度 2.20 g/cm^3 。顶替到位井底静当量 2.22 g/cm^3 。

缓凝水泥浆的配方为:水泥(嘉华G级)+46%高密度铁矿粉(BWOC)+5%微锰(BWOC)+1%微硅(BWOC)+0.8%分散剂+3.5%膨胀剂+1%悬浮剂+3%降失水剂+1%高温缓凝剂+0.2%消泡剂。固液比为0.31,密度 2.35 g/cm^3 。

快干水泥浆的配方为:水泥(嘉华G级)+34%高密度铁矿粉(BWOC)+14%硅粉(BWOC)+5%微锰(BWOC)+1%微硅(BWOC)+0.8%分散剂+1%膨胀剂+1%悬浮剂+3.5%降失水剂+0.7%高温缓凝剂+3%增稠剂+0.2%消泡剂。固液比为0.32,密度 2.2 g/cm^3 。

使用不同水泥浆体系施工参数对比见表5。从表5可以看出,3口井封固裸眼段长、施工排量,水泥浆密度总量相差不大,其中GS001-H62和GS001-H59井使用常规高密度水泥浆体系,水泥浆未返到设计高度,中途井漏。而GS001-H58井使用高密度低摩阻水泥浆体系后,在保证施工排量时,施工泵压与前两口井对比,泵压下降 $4\sim 5\text{ MPa}$,施工中未发生井漏,水泥浆正常返到设计高度,正循环洗井,水泥浆混浆翻出地面。该井后期电测固井质量合格率达到80%,超过高石梯区块其他同类井的固井质量。

表5 施工泵压与同区块同尺寸的井施工参数对比

井号	封固段/m	尾管尺寸/mm	水泥浆体系	缓凝		中凝+快干		施工泵压/ MPa	平均环容/ ($\text{L}\cdot\text{m}^{-1}$)	平均排 量/($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)
				密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总量/ m^3	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总量/ m^3			
GS001-H62	2777~5323.5	177.8	常规高密度	2.26	28	2.2	30.6	16.7~18.3	17	20
GS001-H59	2746~5182	177.8	常规高密度	2.32	25	2.22	33.4	18~20	19.1	20
GS001-H58	2723.75~5415	177.8	高密度低摩阻	2.35	29	2.20	30	12.5~16.5	15.4	20

4.2 高石045-H7井

高石045-H7井位于重庆市潼南区柏梓镇梅家社区。下入 $\varnothing 177.8\text{ mm}$ 尾管进行固井(套管下深 $3042.1\sim 4430.00\text{ m}$),井口 1000.00 m 套管做气密封试验,为下开次安全钻进创造条件。

该井下套管时间长(预计 4 d),有黏卡、气窜风险,激动压力大下套管易井漏;小间隙长封固段,固井时井底最大动当量密度 2.403 g/cm^3 ,易井漏低返;承压能力限制顶替排量($10\sim 17\text{ L/s}$),上部 1000 m 顶替效率低,固井质量不易保障,对高密度

水泥浆的性能有较高要求。本次固井采用一次性正注三凝水泥浆工艺,缓凝中凝水泥浆为密度2.17 g/cm³的G级加重微膨胀水泥浆体系,快干水泥为密度2.10 g/cm³的G级加重韧性微膨胀水泥浆体系,三凝界面2000.00 m/3300.00 m,多返缓凝水泥浆10 m³,设计水泥塞100.00 m左右。

缓凝水泥浆的配方为:水泥(嘉华G级)+40%高密度铁矿粉(BWOC)+3%超细水泥+5.5%微锰(BWOC)+1%微硅(BWOC)+1%分散剂+2%膨胀剂+1%悬浮剂+3%降失水剂+0.3%高温缓凝剂+0.2%消泡剂。固液比为0.365,密度2.17 g/cm³。

快干水泥浆的配方为:水泥(嘉华G级)+30%高密度铁矿粉(BWOC)+1%微硅(BWOC)+0.8%分散剂+1%膨胀剂+1%悬浮剂+3.5%

降失水剂+0.05%高温缓凝剂+2%增稠剂+0.2%消泡剂。固液比为0.37,密度2.1 g/cm³。

高石045-H7井作为西南油气田公司在高石区块第一口全井段应用177.8 mm套管固井的试验井,固井井深4430 m,水泥浆一次性返出地面,对水泥浆性能要求极高。针对该井技术难点,设计要求高密度低摩阻的优化水泥浆体系,水泥浆各项性能指标满足设计要求(见表6),现场施工注入水泥150 t,注水泥浆施工泵压稳定在14~17 MPa。全井段177.8 mm套管固井与常规固井相比,节约钻井周期10~15 d左右。同时固井质量的保障,为下步该区块推广使用高密度低摩阻水泥浆体系提供了坚实的技术基础和成功经验。

表6 施工泵压与施工参数

井号	封固段/m	尾管尺寸/mm	缓凝+中凝		快干		施工泵压/MPa	平均环容/(L·m ⁻¹)	平均排量/(L·s ⁻¹)
			密度/(g·cm ⁻³)	总量/m ³	密度/(g·cm ⁻³)	总量/m ³			
高石045-H7	3042.1~4430	177.8	2.17	53	2.1	18.8	14~17	15	14

5 结论

(1)通过对外加剂和固相材料的优化伍配形成了一套密度范围在2.1~2.4 g/cm³的高密度低摩阻水泥浆体系,该体系稳定性好,性能优异,流变参数 $n>0.8$ 、 $K<0.5$,停机试验稠度增长值 <10 Bc,拥有较好的流变性能,与常规高密度水泥浆体系相比具有更小的摩阻,更利于实现高排量、低压差的安全注替,有效的提升顶替效率。

(2)高密度低摩阻水泥浆体系在高石区块应用2口井,实际施工压力与其他以前施工井对比下降4~6 MPa,理论摩阻压力与实测值高度一致。施工期间未发生井漏,环空流体顶替效率明显提升固井质量合格率超过70%,为后续高石梯区块复杂井况下尾管固井工艺优化提供了有力支撑。

参考文献:

[1] 李坤,徐孝思,黄柏宗.紧密堆积优化水泥浆体系的优势与应用[J].钻井液与完井液,2002(1):4-9,12,54.
[2] 李光辉.超高密度水泥浆体系实验研究与应用[J].科学技术与工程,2016,16(11):147-151.
[3] 林荣壮,耿建卫,郭光奇,等.庆深气田古龙B井抗高温高密度防窜水泥浆研究与应用[J].西部探矿工程,2023,35(12):69-72.
[4] 付雄涛,罗延庆,杨晓龙,等.低摩阻水泥浆在长庆气田桃2区块长水平段固井中的应用[J].石油化工应用,2024,43(3):44-47.

[5] 林强,李德明,陈敏,等.提高高石梯-磨溪区块 $\phi 177.8$ mm尾管固井质量研究与探讨[C]//中国石油学会天然气专业委员会,四川省石油学会,浙江省石油学会.2017年全国天然气学术年会论文集.中石油川庆钻探工程有限公司工程技术处;中石油川庆钻探四川西钻探公司,2017:2299-2309.
[6] 赵常青,张军,孙海芳,等.M-G区块高压气井尾管固井技术[J].钻采工艺,2014,37(2):12-15.
[7] 宋有胜,邹建龙,赵宝辉,等.高石梯-磨溪区块高压气井尾管固井技术[J].钻井液与完井液,2017,34(2):111-116.
[8] 杨钦帆.高磨区块 $\phi 177.8$ mm尾管固井技术的应用[C]//中国石油学会天然气专业委员会.第33届全国天然气学术年会(2023)论文集(04钻采工程).川庆钻探工程有限公司川西钻探公司,2023:659-665.
[9] 付雄涛,罗延庆,杨晓龙,等.低摩阻水泥浆在长庆气田桃2区块长水平段固井中的应用[J].石油化工应用,2024,43(3):44-47.
[10] 杨昆鹏,李鹏晓,敖康伟,等.富满油田长封固段低摩阻超低密度水泥浆固井技术[J].石油钻探技术,2023,51(6):64-70.
[11] 王敬朋,熊友明,路宗羽,等.超深井抗盐高密度固井水泥浆技术[J].钻井液与完井液,2021,38(5):634-640.
[12] 卢海川,朱海金,李宗要,等.水泥浆悬浮剂研究进展[J].油田化学,2014,31(2):307-311.
[13] 杨智光,徐永辉,武永波.适用于小眼井的低摩阻水泥外加剂[J].钻井液与完井液,1997,3:19-22.
[14] 史元,朱思佳,邹亦玮.高密度水泥浆技术研究进展[J].山东化工,2024,53(7):83-86.
[15] 李盼盼,李明泽,郭伟,等.高密度油气井水泥浆的研制及应用[J].水泥,2023(6):18-20,24.
[16] 郝永真.水泥浆主要流变参数的确定与分析[J].水利水电科技进展,2000,4:32-34,70.

(编辑 王文)