



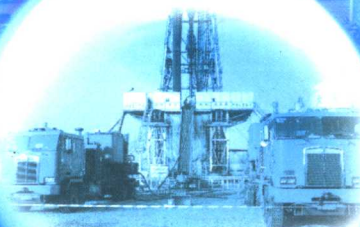
大港油田固井技术

论文集

DAGANG YOUTIAN
GUJING JISHU LUNWENJI

—大港油田集团固井技术服务公司 编—

固井技术服务公司



石油工业出版社

大港油田固井技术论文集

大港油田集团固井技术服务公司 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是由大港油田集团固井技术服务公司从事固井技术研究和现场施工技术人员编写的,共 48 篇论文。全书主要由三部分组成,即:研究与应用、固井工艺技术和其他类的文章。

本书可供从事钻井、固井的管理决策人员、科研人员、工程技术人员及有关院校师生学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

大港油田固井技术论文集/大港油田集团固井技术服务公司编.
北京:石油工业出版社,2007. 10
ISBN 978 - 7 - 5021 - 6267 - 2

I. 大…

II. 大…

III. 固井 - 文集

IV. TE256 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 148297 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www. petropub. com. cn

发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技排版中心

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2007 年 10 月第 1 版 2007 年 10 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本:1/16 印张:19.75

字数:504 千字 印数:1—1100 册

定价:68.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《大港油田固井技术论文集》

编 委 会

主 任：尤 军

副主编：孙勤亮

编 委：（按姓氏笔画排序）

王贵宏 尹 伟 付家文 闫振峰 杨振梅

李志斌 林志辉 岳新庆 高海丽

前 言

大港油田集团固井技术服务公司是一家集固井技术研究、施工设计、现场施工作业、产品开发、技术咨询和技术服务为一体的固井专业化公司。公司依靠特色技术先后为冀东油田、长庆油田、辽河油田、吉林油田、玉门油田、青海油田等国内油田提供了优质的固井设计与施工作业,并跻身国内反承包市场,成功地为美国菲利普斯公司、加拿大泛华公司进行了固井设计与施工作业服务。在努力实现“以特色求生存、以特色求发展”的道路上,造就了一支能吃苦、肯钻研、善于创新、勇于开拓的作业队伍。

为了总结经验,进一步提升技术水平,本书收集整理了近年来公司的部分优秀论文和研究成果。在这本论文集中,读者可以看到近年来甚至更早些时间技术研发工作的印记,也可以看到固井技术工作者最新探索的研究心得,有的论文还成为了更多技术人员后来研究的梯子和参照。技术无疆域,交流与探讨是固井企业发展最需要的学术氛围,是从固井技术人员进而成为固井专家的必要条件。共享研究成果,收获的将是更广泛、更深入的研究成果,可能在总体上节省我们并不充裕的时间、精力和经费,把其用在更加需要的场所。这也是编者集人力、财力公开出版本书的良苦用心所在。

本书主要分为三个部分:研究与应用、固井工艺技术和其他类的文章。本书所涉及的一些理论、观点和认识均是实践工作的总结,论文的作者均是现场的技术骨干和研究人员,胡旺高级工程师审阅了全书。具有一定的参考价值。

在此谨代表编委会向所有参与论文组稿、编辑、核校的各位同仁表达崇高的敬意和深切感谢!

由于编者水平有限,错误及不妥之处在所难免,诚请广大读者予以批评指正!

编 者

2007 年 5 月

目 录

第一部分 研究与应用

含温流变参数和小间隙环空摩阻系数估算方法应用研究

..... 孙勤亮 杨远光 雷 丽 徐正兴(3)

低密度高强度微膨胀水泥浆固井技术的应用 尹 伟 王贵宏 岳新庆(10)

微膨胀韧性防窜水泥浆体系的研究与应用

..... 徐胜本 付家文 林志辉 尹 伟 王贵宏 何炳振 汪金林 沙 东 刘川都(14)

适合小间隙井固井的增塑防窜水泥浆体系研究 杨远光 孙勤亮 谢应权 徐正兴(24)

低密度高强度水泥浆在板深 7 井中的应用

..... 高永会 邢秀平 孙富全 岳发辉 尹 伟(30)

无氯低温早强水泥浆的应用研究

..... 徐 滨 闻国峰 尹 伟 侯占东 王贵宏 杨振梅(34)

低温促凝早强水泥浆室内研究 杨 燕 杨远光 孙勤亮 雷 丽(42)

大港油田水泥浆体系简介 杨振梅 王贵宏(47)

Flush - A 固井冲洗液在大港油田固井中的应用 尹 伟 吴言高(53)

FM 固井隔离液研究与应用 尹 伟 王贵宏 邢金生 王长在(60)

2004 年矿渣 MTC 在马东深层固井上的应用 侯占东 康洪长(68)

MTC 在长芦区块高压油气井中的应用 王贵宏(77)

矿渣 MTC 固井新技术研究与应用 林志辉 王桂富 尹 伟(81)

JS - L1 油井水泥降失水剂研制 杨振梅 王贵宏 陈祥坤 薛立明(92)

HN - 2 高温缓凝剂的室内研究 张 磊 王宗德(97)

深井固井油井水泥外加剂的优选 杨振梅(102)

第二部分 固井工艺技术

2004 年水平井固井技术 尹 伟 侯占东(109)

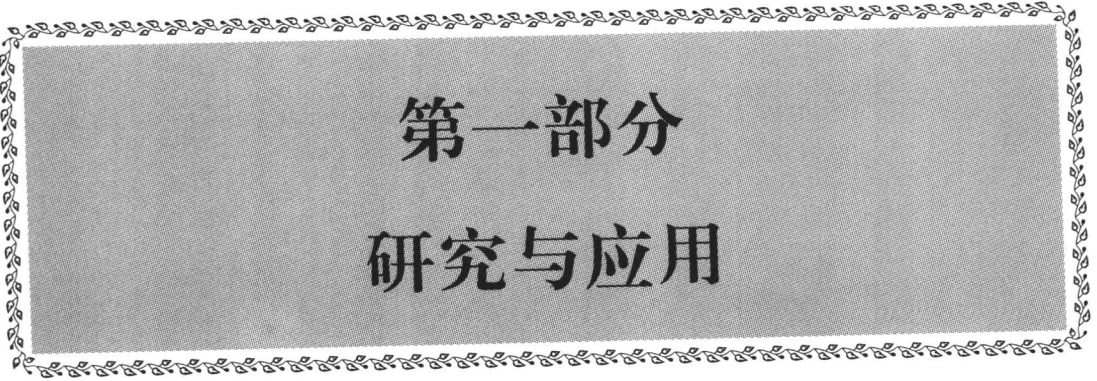
小井眼侧钻水平井尾管固井技术 王桂富(119)

井底循环温度监测技术 尹 伟 徐 滨 闻国峰 毛宝国(125)

冀东油田固井工艺技术简介	付家文(141)
军 19-23 热采井固井技术探讨	侯占东 林志辉(147)
浅谈大港油田双级固井工艺技术	贾平军 王桂富(152)
港 6-27-1 井复杂地质条件下的固井技术	闫振峰(158)
深井长封固段小间隙固井技术	康宏长(162)
官 109-1 断块 1 号平台丛式井固井技术	尹 伟(167)
马东深层固井质量分析与对策	孙勤亮(171)
镇探 2 井超深井尾管固井技术	李志斌(187)
B808 区块储气库双级固井技术	王贵宏 马作朋(192)
苏 20 区块气井固井技术综述	何 刚 普艳伟 王泽明(200)
综合配套固井技术在白东 2×1 井的应用	朱玉江 李志芳 刘广路(207)
浅谈侧钻井完井工艺	王贵富 李祥银 白亮清(214)
配套固井工艺技术在北堡西 3×1 大位移井中的应用	付家文(219)
提高冀东油田固井质量分析与对策	王桂富(228)
提高开窗侧钻井固井质量的探讨	李志斌(234)
唐 H2 井水平井固井技术	侯占东 付友义(240)
水平井固井技术	尹 伟(245)
提高深井固井质量的综合技术	徐胜本(250)
滩海地区固井技术	孙 鹏 周明信 沙 东 刘川都(253)
调整井固井质量分析与对策	王泽峰(257)
L202×1 井油层低返速顶替固井技术	王桂富(261)
多套压力体系固井技术	付家文(270)
浅谈平衡压力固井	修留永 王桂富(276)

第三部分 其他论文

水泥干混工艺技术及质量控制	李明革(285)
浅谈 QHSE 体系运行中的过程控制	徐锡远(289)
三瓣式套管扶正器的研制	马 勇 班玉平 薛立明(293)
运用 TQC 方法改造斯太尔中、后桥制动润滑系统	赵立萍(296)
固井灰罐车的配套改造	万式庚 徐锡远(299)
导入卓越绩效管理模式 打造竞争型固井企业	高海丽(306)



第一部分

研究与应用

含温流变参数和小间隙环空摩阻 系数估算方法应用研究

孙勤亮¹ 杨远光² 雷 丽¹ 徐正兴¹

(1. 大港油田集团固井技术服务公司; 2. 西南石油大学)

摘 要 运用含温流变参数估算法及小间隙环空流动摩阻系数估算法,能较好地解决小间隙环空注水泥设计的流动压力预测与工程实际情况不符的问题。本文通过对比 13 口小间隙井固井的实际,结果表明,理论计算预测的流动压力值与实际施工值吻合较好。

关键词 小间隙环空 含温流变参数 摩阻系数 应用

大港油田历经 30 余年的勘探开发,为寻找新区块和新层系油气资源,近年来,勘探开发遇到的复杂地质条件不断增加,非常规井身结构小间隙井不断增多,其固井质量问题已成为制约复杂地质条件下钻探技术发展的重要因素之一。其问题之一是如何准确计算小间隙井注水泥的流动压力,使施工设计与实际相吻合,以确保安全的情况下提高注水泥的顶替效率,保证固井质量。已有的研究表明,温度和环空间隙是影响流动压力计算的两个重要因素,如何建立适合大港油田实际的温度和环空间隙的影响关系,成为解决这一问题的关键。本文通过建立含温流变参数计算模型和小间隙环空摩阻系数的估算方法,在一定程度上解决了这一问题。

1 大港油田小间隙井固井特点与技术难点

大港油田小间隙井复杂的地质条件及不同的地层特点决定了其深井固井特点,归结起来固井的技术难点主要有:(1)井温高、压力高, $\phi 177.8\text{mm}$ 尾管封固段长(在 1550 ~ 1900m 之间),喇叭口处与井底温差大,对水泥浆在大温差下的凝固特性要求很高,水泥浆性能间的协调难度大;(2)环空间隙小,封固段长,施工压力高,注水泥顶替流态选择受到限制;(3)井下漏失层、高压油气水层并存,固井施工过程中既易发生井涌,又易发生窜流;(4) $\phi 127\text{mm}$ 尾管的管柱内容积小,对顶替量的计量要求高;(5)井径不规则,存在糖葫芦井段,提高顶替效率的难度大。

由此可见,对于这类井,固井水泥浆设计、施工参数设计,施工工艺以及技术措施的实施等方面,任何一环节的细小疏忽,都会直接影响到固井质量。

2 小间隙井流体流变参数的计算方法

水泥浆在不同温度压力下流变参数的计算有两种常用方法:(1)直接用实验数据计算。根据温度和压力条件,实测流体流变参数,采用插值法计算实际井温下的流变参数。(2)用含

温度和压力流变参数方程计算。即根据实验所测得的不同温度压力下的流变参数,建立流变参数与温度压力的关系式(含温度压力流变参数方程),然后用此关系式进行计算。

第二种方法的计算精度较高,并且更方便。根据大港油田使用水泥浆的实验数据,建立了温度影响下的流变参数模型:

τ = τ₀e^{-B(T-T₀)} (1)

式中 τ——温度为 T 时剪切应力的计算值;

τ₀——温度为 T₀ 时剪切应力的实测值;

B——某一速度梯度下的温度系数,即不同速度梯度下有不同的温度系数;

B = ln(τ₀₁/τ₀₂) · 1 / (T₀₁ - T₀₂) (2)

τ₀₁, τ₀₂——分别为某一速度梯度下温度为 T₀₁, T₀₂ 时的切应力。

表 1 是运用上述方法计算流体的流变参数与实测值的对比情况。从表 1 的数据可见,计算不同温度下,某一剪切速率的剪切应力,其总的平均相对误差为 7.81%,只有个别相对误差较大,因此,用该方法估算较高温度下的流变参数在工程上是可行的。

表 1 不同温度下计算剪切应力与实测剪切应力的对比

ρ_c (g/cm ³)	剪切应力 (Pa)		温度(℃)(压力为 14MPa)									ε_e (%)
			27	50	75	90	125 (123)	138	150 (157)	175 (173)	182	
1.91	τ_{600}	实测	137.4	150.02	93.1	73.57	45.82		35.96	25.18		3.91
		理论	137.4	128.87	93.1	76.60	48.59		35.11	25.36		
		ε (%)	0	14.1	0	4.12	6.05		-2.37	0.73		
2.25	τ_{600}	实测	170.8	113.15	93.86	62.95	47.45		36.87	26.89		6.39
		理论	170.7	128.16	93.86	68.74	50.35		-3.0	-13.2		
		ε (%)	0	13.2	0	9.2	6.1		-3.0	-13.2		
2.35	τ_{600}	实测				63.84	(42.07)	33.83	(33.03)	(26.78)	25.9	8.38
		理论				63.84	(41.3)	33.83	(26.37)	(21.35)	18.96	
		ε (%)				0	(-1.8)	0	(-12.2)	(-9.5)	-26.8	
	τ_{300}	实测				26.44	(16.88)	12.28	(10.01)	(8.81)	7.39	9.18
		理论				26.44	(15.61)	12.28	(10.01)	(8.81)	6.08	
		ε (%)				0	(-7.56)	0	(-9.06)	(-20.3)	-17.7	
	τ_{200}	实测				20.52	(12.17)	7.96	(6.82)	(5.35)	4.52	13.9
		理论				20.52	(10.7)	7.96	(5.47)	(3.99)	3.34	
		ε (%)				0	(-12.1)	0	(-19.8)	(25.4)	-26.1	
2.45	τ_{600}	实测	170.3	133.20	97.23	75.61	48.24		41.6	33.37		5.11
		理论	170.3	130.20	97.23	81.61	54.22		40.99	30.24		
		ε (%)	0	3.3	0	7.93	12.4		-2.7	-9.4		
总平均相对误差(%)												7.81

注:(1)ε,ε_e为相对误差和平均相对误差,ρ_c为水泥浆密度。

(2)括号内的数值与表头括号内的温度对应。

3 小间隙环空流动压力计算方法

3.1 摩阻系数计算方法

为准确计算小间隙环空固井的施工压力,首先是确定摩阻系数值 f ,针对大港油田的井身结构情况,进行了理论计算和现场统计两方面的研究。

3.1.1 理论计算

(1)小间隙环空流态判别的标准。

$$Re_c = 4080 - 1720n \quad (3)$$

式中 n ——流体的流性指数,无量纲。

(2)小间隙环空雷诺数计算公式。

$$Re_s = \frac{12 \times 10^3 \rho V^{2-n} D_c^n}{1200^n K \left(\frac{2n+1}{3n} \right)^n} \quad (4)$$

$$D_c = \frac{\sqrt[4]{(D_w^4 - D_c^4) - (D_w^2 - D_c^2)^2 \cdot \left(\ln \frac{D_w}{D_c} \right)^{-1}}}{2} + \frac{\sqrt{D_w^2 - D_c^2}}{2} \quad (5)$$

式中 Re_s ——修正的雷诺数;

D_c ——水力直径,cm;

D_w, D_c ——分别为井眼和套管直径,cm;

ρ ——流体密度, g/cm³;

V ——环空平均流速, m/s;

K ——流体稠度系数, Pa · s ^{n} 。

(3)小间隙环空摩阻系数计算。

对于层流流态,按考虑水力直径后的计算雷诺数,通过常规的关系进行计算:

$$f = \frac{24}{Re_s} \quad (6)$$

对于紊流流态,摩阻系数的计算则采用适合小间隙条件的公式:

$$\frac{1}{\sqrt{f_s}} = A \lg \frac{2}{3} \cdot Re_s \sqrt{f_s} + C \quad (7)$$

式中 $A = \frac{4}{n^{0.75}}; C = \frac{0.4}{n^{1.2}};$

f_s ——摩阻系数。

3.1.2 现场资料统计分析

根据大港油田已固井的数据,分析其摩阻系数 f 与流变性能、环空返速,环空几何尺寸的关系,获得适用于大港油田的经验系数,以保证小间隙流动计算的准确性。

f 的关系式可表示为: $f = F[V_a, (D_w - D_c), \rho, R_{heo}]$ 的函数形式。式中 R_{heo} 为流变性系数;
 V_a 为环空返速。

文中通过试算法对现场数据进行统计分析,得到大港油田小间隙环空的摩阻系数 f 约为 0.001,而常规间隙摩阻系数一般为 0.02 ~ 0.03。

3.2 流动压力计算

大港油田深井小间隙井固井流动计算方法是,通过综合考虑循环温度和环空间隙划分井段,运用相应的流变模式、流变参数及不同环空条件的摩阻系数,分别计算各间隙井段的流动压力而得到全井段的流动压力。具体计算流程如图 1 所示。

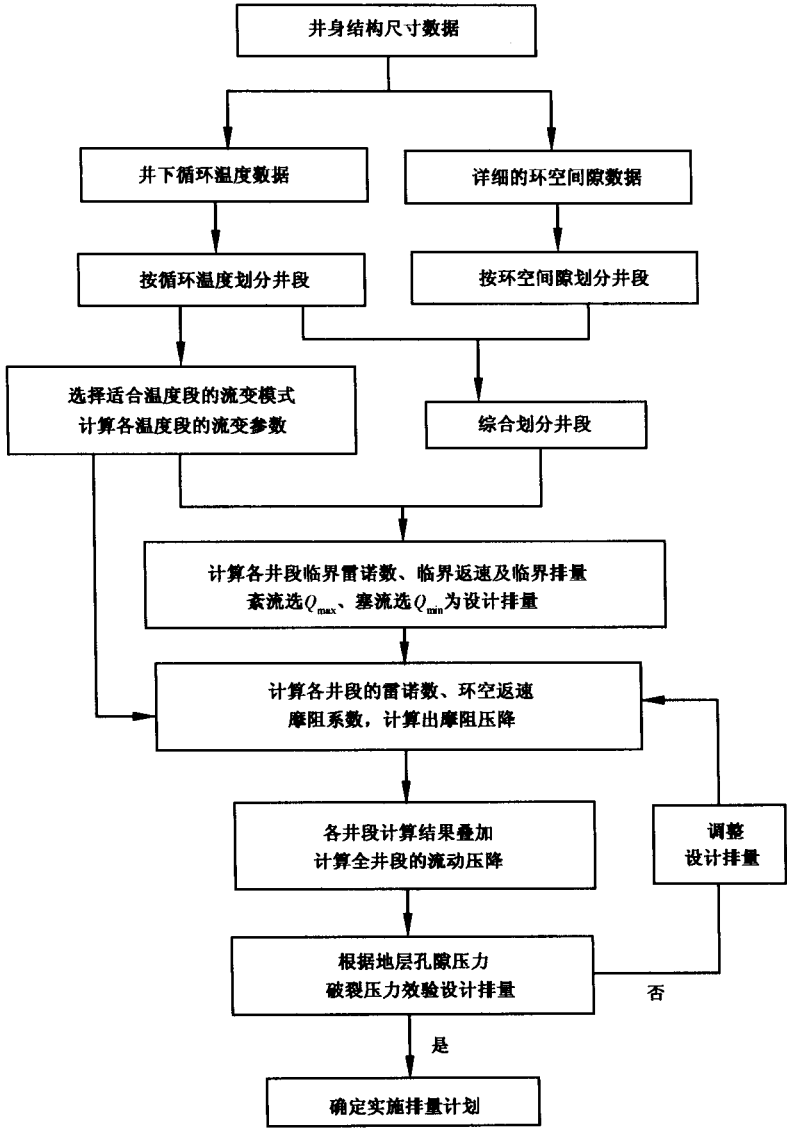


图 1 大港油田小间隙井固井流动计算流程

注:对小间隙环空,采用前述介绍的方法计算,常规间隙环空采用一般方法计算

4 现场应用对比

应用本文介绍的方法,结合提高固井质量的相关技术措施,在大港油田小间隙井固井中试验和应用,试验井的基本情况见表2。试验井的主要施工参数及结果见表3,由表3可见,运用本文的方法可使设计预测的流动压力与施工作业的实际流动压力相吻合,偏差在0.2~1.3MPa之间,并且配合使用紊流前置液,使固井质量得到显著提高。试验13口井,优质9口井,合格4口井,试验和应用井包括不同区块、不同类型、不同体系钻井液(包括聚合物、硅基、甲基及甲酸盐等)。

表2 试验井基本情况

井号	井别	井型	井径×套管直径 (mm)	下深×返深 (m)	封固段长 (m)	钻井液密度 (g/cm ³)	水泥浆密度 (g/cm ³)
港深64×2	评价	定向	215.9×177.8	2418×1110	1308	1.16	1.90
新港508×3	评价	定向	215.9×177.8	3340×1770	1570	1.39	1.62
库2-2	注采	定向	215.9×177.8	2350×0	2350	1.05~1.40	1.86
库2-4	注采	定向	215.9×177.8	2324×0	2324	1.04	领浆1.60 尾浆1.88
库2-1	注采	定向	215.9×177.8	2380×0	2380	1.05	1.90
家41-25	生产	直井	215.9×177.8	2140×1765	375	1.13	1.89
家45-15	生产	定向	215.9×177.8	2207×1790	417	1.13	1.90
家45-13	生产	定向	215.9×177.8	2189×1780	409	1.10	1.90
家45-11	生产	直井	215.9×177.8	2122×1696	426	1.12	1.91
板深32(尾管)	预探	直井	215.9×177.8	5154×2700	2454	1.49	1.60
	预探	直井	152.4×127	5436×4944	492	1.01	1.60
板深31(尾管)	预探	直井	215.9×177.8	4750×2760	1990	1.53	1.61
	预探	直井	152.4×127	5200×4600	600	1.0	1.70
板深22(尾管)	预探	直井	215.9×177.8	5103×3600	1503	1.48	领浆1.59 尾浆1.91
塘深1(尾管)	预探	直井	215.9×177.8	3781×2078	1703	1.35	1.59
	预探	直井	152.4×127	4054×3626	428	1.0	1.60

表 3 试验井的主要作业参数与结果

井号	替浆排量 (m^3/min)	结束泵压 (MPa)		前置液			声幅质量
		计算	实际	用量 (占环空高度)	Re	接触时间 (min)	
港深 64 × 2	1.3 ~ 1.2	9.5	10	清水 300m; 1.45g/cm ³ 稀水泥浆 130m	67385	5.6	优质
新港 508 × 3	1 ~ 0.8	17.2	18	清水 365m	48517	7.8	优质
库 2 - 2	1.1 ~ 2.0	13.3	12	清水 150m; 1.50g/cm ³ 稀水泥浆 150m	59298 ~ 107816	3.8 ~ 2.1	优质
	1.4 ~ 1.45	10.3	11	清水 200m	75471	2.1	
库 2 - 4	1.65 ~ 1.5	9.6	10	清水 225m	80862	3.3	优质
库 2 - 1	1.3 ~ 0.5	12.1	13	清水 150m; 1.50g/cm ³ 稀水泥浆 150m	70030	3.4	优质
家 41 - 25	1.1 ~ 0.9	10.5	10	清水 300m; 1.40g/cm ³ 稀水泥浆 100m	53908	4.5	优质
家 45 - 15	1.3 ~ 1	13.2	14	清水 450m; 1.45g/cm ³ 稀水泥浆 180m	61994	4	优质
家 45 - 13	1 ~ 0.25	9.6	9	清水 370m; 1.45g/cm ³ 稀水泥浆 190m	53908	6	优质
家 45 - 11	1.2 ~ 1.3	9.2	9	清水 150m; 1.50g/cm ³ 稀水泥浆 150m	67385	2.4	优质
板深 32 (尾管)	1 ~ 0.25	8.4	9	清水 260m	53908	6	合格
				1.35g/cm ³ 稀水泥浆 350m	2350	8	
	0.7 ~ 1.2	11.7	12	药水 500m	53173 ~ 91153	9.5 ~ 5.6	
板深 31 (尾管)	0.8 ~ 0.5			药水 400m	43126 ~ 26954	17 ~ 10.6	合格
	0.8 ~ 0.4	6.3	7.5	药水 700m	60769 ~ 30684	12.5 ~ 24	合格
板深 22 (尾管)	1.8 ~ 1.3	9.3	10	药水 380m	97034 ~ 70080	7.5 ~ 10.5	合格
塘深 1 (尾管)	0.7 ~ 0.9	11.6	11	药水 400m	37735 ~ 48517	8.9 ~ 11.4	合格
	0.7 ~ 0.8	11	10	药水 500m	53173 ~ 60769	3.7 ~ 4.3	

5 结论

(1)考虑温度影响估算固井液流变参数和运用适合小间隙环空摩阻系数的估算方法,是解决小间隙环空固井注水泥流动压力预测与实际施工不符的有效方法。

(2)小间隙环空流动压力计算的相关理论和方法(如考虑偏心度的雷诺数计算等)有待进一步研究完善。

参考文献

- 1 刘崇建等编著. 油气井注水泥理论与应用. 北京:石油工业出版社,2001
- 2 汪海阁等著. 小井眼环空压耗的室内试验研究. 石油钻采工艺,1998
- 3 R. C. Mcann and M. S. Quigley. Effects of High - Speed Pipe Roatation on Pressures in Narrow Annuli. SPE 26343
- 4 K. M. Ravi and D. L. Sutton. The Relationships of the Rheological Properties of Cement Slurries and Temperatures. SPE 20449
- 5 Politte, M. D. Invert Oil Mud Theology as a Function of Temperature and pressure. SPE/IADC13458

低密度高强度微膨胀水泥浆固井技术的应用

尹 伟^① 王贵宏 岳新庆

摘 要 低压易漏长封固段固井质量一直是大港油田难以攻克的技术难题,通过采用 Furnas 颗粒堆积最密实级配原理以及确定物料间的物理化学作用所研制开发出的密度为 $1.30 \sim 1.45 \text{ g/cm}^3$ 低密度高强度微膨胀水泥浆体系具有良好的沉降稳定性和流变性,并且 API 失水小,无析水,稠化过渡时间短,静胶凝强度发展形态好,防窜能力强,凝结成的水泥石体积不收缩,结构致密,具有一定的线形膨胀率,而且抗盐性好,利于海水直接配制。经 2004—2005 年现场应用 49 口井,其中 43 口固井质量优质,6 口固井质量合格,有效地提高了一、二界面的固井胶结质量。

关键词 低密度高强度微膨胀水泥浆 颗粒级配 低压易漏长封固井段 固井胶结质量

低压易漏长封固段固井质量一直是大港油田难以攻克的技术难题,在某些探井和开发井区块中显得尤为突出。以往,对于低压易漏长封固段区块固井,大港油田经常采用双级注水泥固井技术,一是需要降低水泥浆的密度,从而减少静液柱压力,在较低的泵压下,获得良好的顶替效率,保证固井质量;二是固井周期长、风险大、成本高。即便是采用普通低密度水泥浆体系固井,其密度也在 1.60 g/cm^3 以上,大大地超过了钻井液密度,固井过程中不是造成固井漏失就是压死油气层,不能保证一、二界面固井封固质量,不利于对油气层的保护。为了解决低压易漏长封固段固井技术难题,经室内研究和试验确定采用低密度高强度微膨胀水泥浆体系固井。该套水泥浆体系密度低、沉降稳定性和流变性好,API 失水小,无析水,固化后水泥石强度高,结构致密,防窜性能强,并且体积不收缩,还具有一定的线形膨胀率,能够满足封固油气层的要求,同时降低了施工作业时井眼环空中的静液柱压力,从而降低了低压漏失地层的风险,确保了一、二界面固井封固质量,保护了油气层。2004—2005 年使用低密度早强微膨胀水泥浆体系在大港油田固井 49 口井,其中 43 口固井质量优质,6 口固井质量合格。

1 设计原理、配方组成和综合性能

1.1 设计原理

低密度高强度微膨胀水泥浆体系是根据以下原理进行研究和设计的:

(1) 根据 Furnas 颗粒堆积最密实级配原理,通过调节混合物固相的不同颗粒尺寸分布,进行合理级配和加工,使水泥浆体系实现良好的空隙充填,使多种尺寸颗粒分布的混合物紧密堆积(单位体积水泥浆中含有更多的固相),从而得到高性能的水泥浆。即在第一级大颗粒堆积空隙中充填进比第一级大颗粒小得多的第二级粒子,第二级粒子充填满第一级颗粒空隙后,总体积不变;然后用粒径比第二级粒子小得多的第三级粒子充填满第二级颗粒空隙,总体积仍保

① 不标明单位的均为大港油田集团固井技术服务公司人员。