

# 环空流动壁面剪应力对固井质量的影响

郑 毅<sup>1,2</sup>, 刘爱平<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学 北京 北京 100083; 2. 中国石油天然气集团公司 北京 100724; 3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院 河北 廊坊 065000)

**摘 要** :应用壁面剪应力固井解决了委内瑞拉 Caracoles 油田固井实践中存在的顶替效率问题。壁面剪应力固井的主要观点是 水泥浆在环空流动的壁面剪应力达到 15 Pa 时 ,可以保证 CBL、VDL 和 SBT 三项胶结测井结果合格 ;水泥浆在环空流动的壁面剪应力达到 30 Pa 时 ,可以保证 CBL、VDL 和 SBT 三项胶结测井结果优质。高的壁面剪应力可以通过紊流获得 ,也可以通过提高水泥浆粘切力获得。

**关键词** :壁面剪应力 ;固井 ;泥浆环空流动

中图分类号 :TE256 文献标识码 :A 文章编号 :1000-3746(2003)03-0038-04

**The Effects of Shearing Stress Along the Annulus Wall on the Cementing Quality/ZHENG Yi<sup>1,2</sup>, LIU Ai-ping<sup>3</sup>**( 1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. China National Petroleum Corporation, Beijing 100724, China; 3. Langfang Branch Institute of Petroleum Exploration and Development of PetroChina, Langfang Hebei 065000, China )

**Abstract** :The replacement efficiency problems encountered in casing cementing practice in Caracoles Oil Field of Venezuela was resolved by using wall surface shearing stress cementing. The main points of wall surface shearing stress cementing are as follows. The results of three type of cementation logging, e. g. CBL, VDL and SBT, can be ensured to meet the requirements, while the shearing stress along the well surface reached 15 Pa during grouting. When the shearing stress reached 30 Pa the results of CBL, VDL and SBT cementation logging can reach the best. High shearing stress can be gained by turbulence or by increasing gel strength of grout.

**Key words** :shearing stress along well surface; cementing; mud flowing through annulus

## 1 概述

委内瑞拉 Caracoles 油田属于低压高渗油田 ,井下地质状况非常复杂。特殊的地质条件产生了特殊的固井难题。胶结测井反映有气窜问题 ,但在可计算并预测的条件下 ,按照气窜胶凝理论计算的气窜潜能系数(GFP)方法预测值为 0.4 ,不可能发生气窜 ;怀疑存在顶替效率方面的问题 ,但文献已记载的所有提高顶替效率的措施均已采取。这样的结果说明需要解决的不是一般的生产问题 ,而是一些尚未认识的深层次的问题。通过对井史资料分析、施工队伍装备和施工技术考察以及相关的技术讨论 ,全面研究分析该油田固井技术的各个环节后 ,我们提出运用环空流动的壁面剪应力模式 ,收到了较好效果。

壁面剪应力固井的主要观点是 :清除附着在井壁上的“虚泥饼”必需一个驱动力 ,这个力主要是环空流动的壁面剪应力 ;水泥浆在环空流动的壁面剪应力达到 15 Pa 时 ,可以保证 CBL、VDL 和 SBT 三项

胶结测井结果合格 ;水泥浆在环空流动的壁面剪应力达到 30 Pa 时 ,可以保证 CBL、VDL 和 SBT 三项胶结测井结果优质。高的壁面剪应力可以通过紊流获得 ,也可以通过提高水泥浆粘切力获得。

该模式将井径、流动的摩擦阻力和水泥浆流变性以及设备能力关联起来 ,可以定量确定保证固井质量的环空返速。但未考虑环空流动的接触时间对固井顶替效率的影响。通过 CBL、VDL 和 SBT 三项胶结测井检查 ,该模式在 Caracoles 油田实施后 ,2000 年固井的层间封隔合格率达到 96.23% ,2001 年达到了 100% ,特别是在 2001 年对主力油层的封隔优质率达到了 100%。

## 2 壁面剪应力计算公式

如图 1 所示 ,井眼直径为  $D$  ,套管直径为  $d$ 。假设水泥浆封固段长度为  $L$  ,水泥浆在环空流动的摩擦阻力为  $\Delta P$  ,作用在套管和井壁表面的壁面剪应力

收稿日期 2002-11-09

作者简介 :郑毅(1957-) ,安徽人 ,中国地质大学博士在读 ,中国石油天然气集团公司市场管理部副总工程师、高级工程师 ,石油工程专业 ,从事石油工程技术管理工作 ,北京市西城区六铺炕 6 号 (010)62094229 ,zheng7374@sohu.com ;刘爱平(1963-) ,陕西宝鸡人 ,中国石油勘探开发研究院廊坊分院高级工程师 ,石油工程专业 ,硕士 ,从事固井技术研究工作 ,河北省廊坊市 (010)62098672。

分别为  $\tau_{w1}$  和  $\tau_{w2}$ 。根据力的平衡原理有如下关系：

$$\Delta P \pi (D^2 - d^2) / 4 = \pi L (d \tau_{w1} + D \tau_{w2})$$

化简后,可得作用在井壁上的壁面剪应力为：

$$\tau_{w2} = \Delta P (D^2 - d^2) / (4LD) - d \tau_{w1} / D \quad (1)$$

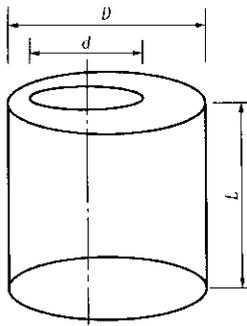


图 1 环空示意图

公式(1)中包括作用在套管表面的壁面剪应力,为方便使用,假设  $\tau_{w1} = \tau_{w2}$ ,并记  $\tau_{w2}$  为  $\tau_w$ ,则有如下公式：

$$\tau_w = \Delta P (D - d) / (4L) \quad (2)$$

公式(2)表明:环空流动的水泥浆作用在井壁上的壁面剪应力与水泥浆环空流动的摩擦阻力成正比,与环空当量直径成正比,与封固段长度成反比。由于环空流动的摩擦阻力也与水泥浆流变参数和环空返速有关,因此,公式(2)也将水泥浆流变参数和环空返速联系起来。

### 3 相关的研究成果

水泥环封隔质量的关键是提高顶替效率,提高顶替效率的途径有:保持两相流接触面的平整,控制适宜施工的工程条件。由此发展的施工技术包括:低速顶替技术、塞流顶替技术和紊流顶替技术。目前的普遍认识是紊流顶替的施工效果最好。但是,有相当一部分实际的施工实例是在流体流动状态达不到紊流的情况下进行的,而且也获得了很好的施工结果,这说明除了紊流之外还有更重要的因素影响顶替效率,促使我们对影响顶替效率的因素重新分析考虑。

很早以前有关专家对水泥浆与钻井液在顶替方面的关系进行过研究,并认为水泥浆胶凝强度应至少超过钻井液胶凝强度一定数值。由于井下条件下的钻井液胶凝强度难以测量,实际使用时有许多困难,但也得出一个重要的技术结论:水泥浆密度应至少比钻井液密度高  $0.24 \text{ g/cm}^3$ 。

文献[1]专门对如何顶替部分脱水的胶凝钻井液及滤饼做了研究,并发展了一种专利的室内试验

方法,用于确定固井时达到优质封隔所需的最小壁面剪应力,并明确提出:只要环空流动的摩擦超过一定数值,就可以冲蚀掉附着在井壁上的部分脱水的胶凝钻井液及滤饼。文中还引用 Potanin 等人的结论,认为部分脱水的胶凝钻井液及滤饼的胶凝强度用以下公式计算：

$$\tau_{o,e} = \frac{1}{4a^2} \times \frac{Aa}{12h^2} \times 9.5364 \times 10^{23} \quad (3)$$

式中  $\tau_{o,e}$ ——部分脱水的胶凝钻井液及滤饼的胶凝强度,Pa;  $a$ ——钻井液中固相颗粒的平均半径,  $\mu\text{m}$ ;  $A$ ——Hamaker 系数,为已知聚合物的极限值,取  $3 \times 10^{-20} \text{ J}$ ;  $h$ ——2 个单一固相颗粒表面之间的距离,  $\text{nm}$ 。

当  $a = 5 \mu\text{m}$ 、 $h = 2 \text{ nm}$  时,计算结果为  $\tau_{o,e} = 29.8 \text{ Pa}$ 。

相对难以清除的钻井液中常用的重晶石(其平均粒径为  $10 \mu\text{m}$ ),假设其最小粒径  $< 1 \mu\text{m}$ ,计算得  $\tau_{o,e} \approx 300 \text{ Pa}$ 。故此,将部分脱水的胶凝钻井液及滤饼的可冲蚀能力定义为：

$$E_{df} = 300 / \tau_w \quad (4)$$

$E_{df}$  愈大表明部分脱水的胶凝钻井液及滤饼愈容易被清除掉。 $E_{df}$  由专门设计的试验装置在施工前数天通过试验获得。

上述方法未能得到充分重视,主要是由于以下 2 个原因:按照 Halliburton 及其它服务公司紊流顶替的主要技术观点,实际施工的壁面剪应力在许多情况下难以达到试验结果的要求,试验需要费时 6 天,实际施工时的钻井液状况可能已经发生较大变化。

文献[2]通过对 6 种不同钻井液的研究分析得到结论:经过 12 h 老化的钻井液,其静切力不超过  $25 \text{ Pa}$ (图 2)。

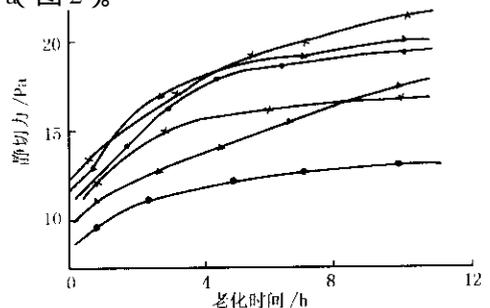


图 2 老化时间对钻井液静切力的影响

如果考虑到固井之前充分循环钻井液的操作,可以把钻井液老化后的静切力近似看作部分脱水的胶凝钻井液及滤饼的胶凝强度,这可使壁面剪应力的观点更具实用性。

#### 4 技术观点的改进

影响顶替效率的因素非常多,例如:井径、井深、钻井液性能、水泥浆性能、注替排量、接触时间等等。通过对委内瑞拉 Caracoles 油田 20 口井的固井参数深入分析后认为:在井下条件确定的情况下,决定性的因素是环空流动的壁面剪应力。

把流动的壁面剪应力作为影响顶替效率的主要因素,是基于以下原因:

(1)清除附着在井壁上的胶凝钻井液,必须要有一定的力。只有流动才能产生直接作用于井壁并清除胶凝钻井液的动力——流动的壁面剪应力。

(2)紊流流动时,由于摩擦阻力近似与流动速度的平方成正比,所以流动的壁面剪应力在一般情况下大于其它流态。但是,从流动计算的相关公式可以知道,同样大小的壁面剪应力也可以通过增加流体的塑性粘度和屈服值获得。对于塞流顶替,主要要求水泥浆要高粘切力,以产生相对高的壁面剪应力。

(3)在固井技术的发展过程中,产生了各种不同的顶替技术,例如塞流顶替和紊流顶替以及介于二者之间的低速顶替技术,每项技术都可以找到很多成功的实例。壁面剪应力设计的观点也与这些技术结论非常吻合。

Caracoles 油田的固井实践和相关的研究结果表明:当壁面剪应力  $\tau_w$  接近 15 Pa 时,固井顶替效率的结果可以达到良好层间封隔的效果;当壁面剪应力  $\tau_w$  接近 30 Pa 时,顶替效率的结果不但可以达到良好层间封隔的效果,而且可以实现产层本身的胶结优质。

由于壁面剪应力的计算公式关联了井径、封固段长、摩擦阻力、流变参数、返速、排量、钻井液胶凝强度等影响固井质量的重要因素,因此固井所需的最低返速和排量不再以是否达到紊流作为判断准则,而是以是否获得清除胶凝钻井液所需的最小壁面剪应力作为判断准则。

图 3 和图 4 给出了达到 15 Pa 和 30 Pa 这 2 个临界值时的胶结测井结果典型示例。

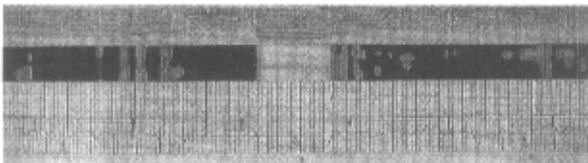


图 3 壁面剪应力  $< 15$  Pa 的典型固井质量图

万方数据

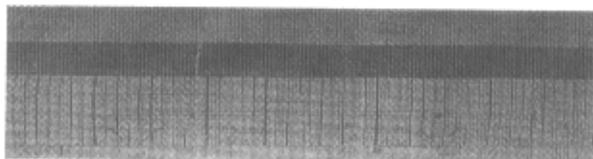


图 4 壁面剪应力接近 30 Pa 的典型固井质量图

按照紊流顶替的技术观点,Halliburton 等公司的水泥浆塑性粘度一般设计为  $40 \sim 80 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,屈服值一般设计为  $3.5 \sim 6 \text{ Pa}$ 。但也有一些公司采用层流顶替技术,水泥浆塑性粘度一般设计为  $140 \sim 250 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,屈服值一般设计为  $12 \sim 35 \text{ Pa}$ (这样的粘切力的水泥浆在实验室配制出来的初始稠度就达到了 30 Bc),在高速顶替情况下,其施工效果并不比紊流顶替差。图 3 和表 1 就是前者的施工结果,图 4 和表 2 则是后者的施工结果。

表 1 和表 2 是在 Caracoles 油田实际固井的壁面剪应力计算结果。表中列出的施工实例,前置液用量均超过 500 m,施工前充分循环钻井液,扶正器数量足以保证套管居中,并且在施工过程中保持活动套管。

表 1 1998 ~ 1999 年固井施工壁面剪应力

编号	摩擦阻力/kPa	壁面剪应力/Pa
1	223.1	6.64
2	344.5	13.97
3	511.5	14.38
4	364.4	13.92
5	275.0	7.63
6	290.8	13.31

表 2 2000 年固井施工壁面剪应力

编号	摩擦阻力/kPa	壁面剪应力/Pa
1	1098.8	27.97
2	838.0	23.92
3	325.5	16.58
4	193.8	9.34
5	839.5	24.15
6	707.3	37.62
7	1638.1	41.82
8	494.5	27.24
9	499.6	21.34
10	685.1	31.27
11	1780.9	47.27
12	1781.3	67.64
13	652.8	36.93
14	1521.5	44.97

在表 1 中,最大壁面剪应力 14.38 Pa,最小壁面剪应力 6.64 Pa,对比实际的固井质量状况,除去其它影响因素,壁面剪应力大的井固井质量好于壁面

剪应力小的井。

表 2 中,壁面剪应力最大为 67.64 Pa,远大于 30 Pa 的临界值。

以上 2 个表中的数据反映出:除去影响固井质量的其它因素如前置液外,特别是在套管居中的条件下,壁面剪应力大的井,固井质量好于其它井。

从公式(2)中,也不难得出以下几点重要推论:在井眼几何条件一定的情况下, $\Delta P$  是一个与流动速度和流变参数有关的量,降低钻井液粘切力对于提高顶替效率非常重要,当  $\tau_w$  与钻井液胶凝强度接近时,接触时间对清除泥饼至关重要,用前置液稀释钻井液,对提高顶替效率非常有益。

需要说明:紊流顶替相对于层流顶替的优点会在套管不居中时体现出来,但如果套管不居中,任何流态都不会有太好的固井质量。

## 5 结论及建议

通过对委内瑞拉 Caracoles 油田 20 口井的资料分析,获得以下结论:

(1)壁面剪应力是影响固井顶替效率的关键因素,只要保证环空水泥浆流动的壁面剪应力  $> 30$  Pa,就能够保证顶替效果。

(2)壁面剪应力设计方法从理论上把塞流顶替、低速顶替以及紊流顶替技术统一了起来。

(3)保证顶替效率的固井施工最低返速,是要求环空壁面剪应力不低于最小壁面剪应力。

## 参考文献:

- [1] K. M. Ravi, R. M. Beirute, R. L. Covington. Erodability of Partially Dehydrated Gelled Drilling Fluid and Filter Cake[J]. SPE 24571, 1992.
- [2] 向兴金,郭留敢.影响聚合物泥浆体系静结构的因素分析[J].钻井液与完井液,1992(1).
- [3] T. R. Smith. Cementing Displacement Practices: Applications in the Field[J]. SPE 18617, 1989.
- [4] T. R. Smith, R. M. Ravi. Investigation of Drilling Fluid Properties to Maximize Cement Displacement Efficiency[J]. SPE 22775, 1991.
- [5] R. M. Beirute, F. L. Sabins, K. M. Ravi. Large-Scale Experiment Show Proper Hole Conditioning—A Critical Requirement for Successful Cementing Operations[J]. SPE 22774, 1991.
- [6] H. D. Outmans. Mechanics of Static and Dynamic Filtration in the Bore Hole[J]. SPE 491, 1963.
- [7] E. J. Fordham, H. K. J. Ladva, C. Hall. Dynamic Filtration of Bentonite Muds under Different Flow Conditions[J]. SPE 18038, 1988.
- [8] S. N. Shah, D. L. Sutton. New Friction Correlation for Cements From Pipe and Rotational Viscometer Data[J]. SPE 18539, 1989.
- [9] C. F. Lockyear, D. F. Ryan, M. M. Gunningham. Cement Channeling: How to Predict and Prevent[J]. SPE 19865, 1989.
- [10] M. R. Well, R. C. Smith. Analysis of Cementing Turbulators[J]. SPE 19542, 1989.

## “2003 年中国交通土建工程学术暨建设成果交流会”7 月在成都举行

主办单位:中国铁道学会、西南交通大学

支持单位:中国铁道部科技教育司、中国铁道部建设管理司、中国铁道科学研究院、成都市交通局

协办单位:美国设备制造商协会北京代表处、四川省公路规划勘察设计院、四川省土木建筑学会、成都铁路工程(集团)有限责任公司、中铁二局股份有限公司、成都市地铁建设工程办公室

时间:2003 年 7 月 9 ~ 11 日

地点:四川·成都·西南交通大学

宗旨:展示中国交通土建工程的建设成果,提高我国交通土建工程领域的科技水平,加强该领域科技工作者的交流与合作

主题:交通土建工程领域中的新理论、新技术、新成果

形式(1)编辑出版《2003 年中国交通土建工程学术暨建设成果论文集》

(2)举行大会特邀专题报告会

—特邀相关部委领导及地方建设主管部门领导做政策性发言

—国内各高校及国外专家做行业发展学术报告

(3)举行学术分组讨论会

—铁路专题、公路专题、隧道专题、桥梁专题、城市轨道交通专题、路用新材料新技术专题同期活动

(4)2003 年中国交通土建工程建设成果与施工设备器材展示会

(5)中国交通土建新技术、新成果推介会

(6)企业的技术/项目合作洽谈会、项目招标会

(7)西部铁路、公路建设成果图片及沙盘展示

地址:四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学 91 号信箱

邮编:610031

咨询电话:(028)87601117、87601177、87634748、87601136

联系人:曾珂、余音、袁波、林丹丹、贾平、付建梅、王强

电子信箱:zyj@home.swjtu.edu.cn

网址:http://key.swjtu.edu.cn