

文章编号:1673-5005(2008)01-0077-05

深水固井技术研究进展

王瑞和, 王成文, 步玉环, 程荣超

(中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061)

摘要:深水固井技术是深水油气钻完井的关键技术之一,为促进深水固井技术的研究与发展,对深水固井所面临的问题进行了较全面的分析。在总结国外深水固井水泥浆体系、注水泥顶替技术、固井设备、固井工艺和水泥环长期封隔性能研究现状的基础上,指出深水固井技术研究应以固井体系设计简单和施工方便为前提,以“对环境友好”为原则、以水泥环实现长期封隔为目的。

关键词:深水固井; 水泥浆; 固井工艺; 研究进展

中图分类号:TE 256 **文献标识码:**A

Research development of deepwater cementing technique

WANG Rui-he, WANG Cheng-wen, BU Yu-huan, CHENG Rong-chao

(College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China)

Abstract: Deepwater cementing technique is one of the key techniques in deepwater oil and gas drilling and completion. In order to improve the research development of deepwater cementing, the problems confronted in deepwater cementing were comprehensively analyzed. Based on the summarization on foreign research development in cement slurry systems for deepwater cementing, cement displacement technology, cementing equipment, cementing technology and investigation on the long-term isolation capability of cement sheath, the following are conclusions: The deepwater cementing technique study should take the prerequisite for cement systems with simple design and convenient execution, the environment-friendly principle and the ultimate realization for long-term zonal isolation of cement sheath.

Key words: deepwater cementing; cement slurry; cementing technology; research development

深水的定义是随钻井技术发展而变化的,10年前指水深超过300 m海域,目前指水深超过500 m海域,水深超过1500 m称为超深水。2005年全球深水油气产量虽然仅占全球油气总产量的2.04%,但在过去几年中,深水油气发现量却占了全球油气发现总量的40%,特别在2002—2003年更是上升至65%。到目前为止,已在深水海域探明石油储量 $90.573 \times 10^8 \text{ m}^3$,估计还有 $(135.065 \sim 158.9) \times 10^8 \text{ m}^3$ 的未探明储量,许多石油公司都竞相涉足深水海域的开发^[1]。深水固井技术是深水油气资源高效、经济、安全开采的前提条件和重要保障。然而,深水固井常面临许多问题,经过近30年发展,虽然在深水固井水泥体系、水泥外加剂、防窜理论与技术、注水泥技术和固井设备等方面都取得了较大进步,但

仍有许多问题亟待解决。深水固井技术研究已成为当今油气井工程领域研究的热点和难点。我国深水固井技术研究刚刚起步,为更好地促进我国深水固井技术的发展,笔者对深水固井面临的问题进行分析,概括国外近30年深水固井研究情况,对深水固井技术未来发展方向进行展望。

1 深水固井面临的问题

深水固井(特别是表层段)与常规固井相比,常面临低温、浅层水-气流动、松软地层、异常高压砂层、高昂的深水钻井装置租赁费用等问题,固井时需要考虑候凝时间(WOC)、低温水-气窜、水泥浆密度低以及密度“窗口”窄、井眼环空间隙大、井眼不规则、顶替效率差等因素的影响^[2]。其中,浅层水-气流动、低

收稿日期:2007-06-19

基金项目:国家“863”高新技术研究发展计划项目(2006AA09Z340)

作者简介:王瑞和(1957-),男(汉族),山东莒县人,教授,博士,博士生导师,主要从事油气井工程及射流动力学等方面的研究。

温、水泥浆顶替效率差、表层段水泥环封隔性能差和费用高是深水固井所面临的主要问题。

1.1 浅层水-气流动

引起浅层水-气流动的主要原因是海底存在异常高压层、浅层气或气体水合物不稳定分解。浅层水-气流动最早出现并被认识是在 1985 年,它代表了深水固井中最具有挑战性的因素。浅层水-气流动常使井眼被过度冲刷,造成井径不规则,泥饼清除困难,固井界面胶结质量差,易出现微间隙;同时,如果固井水泥浆设计不合理,浅层水-气流体在候凝时会侵入水泥浆中而产生窜流现象,出现微窜槽。微间隙和微窜槽会使固井水泥环封隔作用失效,危及到防喷器和隔水管的安全性,甚至整口井的安全性^[3]。

1.2 低温

表 1 为不同地区海水温度随水深的变化情况。

表 2 温度对胜滩 G 级水泥抗压强度影响

$w(\text{CaCl}_2)/\%$	水灰比 w_w/w_c	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	4 °C 强度 p_4/MPa		10 °C 强度 p_{10}/MPa		20 °C 强度 p_{20}/MPa		35 °C 强度 p_{35}/MPa	
			12 h	24 h	12 h	24 h	12 h	24 h	12 h	24 h
0	0.44	1.92	—	0.25	—	0.83	0.52	5.14	2.47	11.50
2.5	0.44	1.92	0.50	2.15	1.83	5.83	7.20	13.85		

1.3 水泥浆顶替效率差

深水固井的水泥浆顶替效率差主要有 4 方面原因^[5,6]:① 深水海底的表层大多是未胶结的松软地层,其地层孔隙压力与破裂压力之间的“窗口”狭窄,很难实现密度差为 10% 的分级密度梯度顶替和紊流顶替;② 表层松软地层在钻井时由于浅层水-气流动、高压砂层等影响,造成井身结构不规则,使流体流动摩擦很大,不易实现紊流顶替;③ 井身结构不规则使套管很难居中;④ 复杂的套管结构设计,使得表层套管与井眼间的环空间隙很大,而在井下部环空间隙反而很小。

在地层孔隙压力与破裂压力之间“窗口”狭窄、套管不居中等条件下,环空间隙过大或过小都难以实现紊流顶替。

1.4 表层段水泥环封隔性能差

表层段水泥环封隔性能差的原因主要有^[7]:① 深水海底表层段主要是松软地层,与水泥环界面胶结能力弱。海底的沉积岩层形成时间较短,又缺乏足够的上覆岩层,所以海底表层结构通常是松软的、未胶结的地层,甚至还有长段的软泥沉积物,如在挪威 Gjallar 深水区域,其海底 100 m 以下是长达 600 m 的软泥沉积物地层。② 表层段松软地层对水泥环的支撑作用弱,易使水泥环在热应力、液压应力或压实应力(异常高压突然释放后引起地层孔隙压力

由表 1 可知,深水海域海底温度一般在 4 °C 左右^[4]。温度是对水泥浆和水泥石性能影响最重要的一个因素,本文中测试了胜滩 G 级水泥在不同温度下的抗压强度,结果见表 2。从表 2 可知,无论 G 级水泥净浆还是加 2.5% CaCl_2 促凝剂 G 级水泥浆,随着温度降低,其强度下降趋势较明显,特别是在 4 °C 时,水泥强度发展非常缓慢。另外,低温还会严重影响水泥浆胶凝强度发展,使水泥浆长期处于胶凝失重状态,增大浅层水-气窜流风险。

表 1 不同地区的海水温度

深度	海水温度 $\theta/^\circ\text{C}$		
	纽芬兰海域	北海	墨西哥海湾
海平面	-1.7	4	23
海平面 ~ 500 m	-1.7	4	8
500 m ~ 海底	3	4	4.4

降低使地层沉陷所产生的应力)等作用下产生裂缝,破坏水泥环整体性。③ 深水海底存在窜流根源——异常高压砂层、盐水和气体水合物。

表层段水泥环封隔性能差以及窜流流体的存在,常使得在固井作业完毕后就能观测到流体窜流现象,或者在一定时间后地层流体沿水泥环裂缝发生窜流,出现地下层间窜流现象或 SCP (sustained casinghead pressure, 在环空套管头处可测量的一种压力,具有释放后能恢复的特征,它不全是由于温度变化引起的,也不是有意施加的压力)现象,甚至发生套管外井喷,使固井作业失败。

1.5 费用高

导致深水固井费用比陆上固井高的原因有:① 为解决低温、浅层水-气流动等问题所采用的材料或工艺措施,增大了水泥浆体系成本和固井作业费用;② 日益严格的海洋环境保护法规要求固井水泥浆体系应对环境友好(特别在表层段固井),清洗固井设备等过程的“零”排放,对固井外加剂的毒性和固井作业提出了新要求;③ 随着水深增加,后勤供应变得更加困难,增大了各项作业费用;④ 目前海上深水钻井装置利用率都接近或达到 100%,并且日费大幅攀升,最高日费已突破 50 万美元(2006 年 5 月,墨西哥海湾),深水钻井装置日费攀升使油气井建井成本大幅度增加^[8]。

2 国外深水固井技术

2.1 固井水泥浆体系

国外深水固井水泥浆体系有低密度填料水泥浆体系、低温快凝水泥浆体系、泡沫水泥浆体系、最优粒径分布(optimised particle size distribution, OPSD)水泥浆体系、超低密度水泥浆体系。随着水深的增加,温度越来越低,浅层水-气窜流风险越来越大,泡沫水泥浆体系和 OPSD 水泥浆体系逐渐成为深水固井主要选择。

2.1.1 泡沫水泥浆体系

泡沫水泥浆是由水泥、含有外加剂的粘稠液体和气体共同形成的三相可压缩流体,具有良好的防窜能力和顶替效率。泡沫水泥石塑性比常规水泥石好,能有效防止水泥石破裂,保证水泥环整体性。从1994年在墨西哥海湾地区第一次采用泡沫水泥浆解决浅层水流动问题以来,已在墨西哥海湾、尼罗河三角洲和安哥拉等地区成功作业几百次^[9]。成功的现场应用促进了泡沫水泥浆的发展,目前除用油井水泥来制备泡沫水泥浆外,还有 Chatterji 开发的矿渣泡沫水泥浆体系, Halliburton 公司 Lance 开发的铝酸钙泡沫水泥浆体系和 Baireddy 开发的较短“过渡时间”泡沫水泥浆体系、化学发泡泡沫水泥浆体系、高强中空微珠+化学发泡泡沫水泥浆体系, Schlumberger 公司 Stiles 开发的 RAS(right-angle-set)泡沫水泥浆体系和 David 开发的低水灰比泡沫水泥浆体系等^[10-12]。随着对海洋环境保护的不断重视,近年国外加快了对环境友好的油井水泥外加剂、泡沫发泡剂和稳泡剂的开发^[13]。

2.1.2 OPSD 水泥浆体系

OPSD 水泥浆体系是通过优化材料粒径分布,实现颗粒紧密堆积的高性能水泥浆体系,具有强度发展快、强度高、渗透率和孔隙度低、施工简单等优点。在深水固井方面,报道较多的是 Schlumberger 低温低密度型 OPSD 水泥浆体系,即 DeepCRET 水泥浆体系。该体系于1998年首次应用于非洲刚果1300 m深水井固井作业,目前已在墨西哥海湾、特立尼达岛、委内瑞拉、黑海和西非等地区成功固井作业很多次,该体系特别适合于后勤供应困难、浅层水-气流动风险低的西非地区。2002年4月,DeepCRET 水泥浆体系首次在亚洲的马来西亚东部南中国海1700 m深水井固井作业中应用,目前在该区域已成功进行了14井次深水固井作业^[14-15]。

2.2 注水泥顶替技术

2.2.1 冲洗液和隔离液研究

深水固井常面对松软、未固结地层,其孔隙压力与破裂压力之间“窗口”狭窄,很难获得紊流顶替,而更多的是塞流顶替。为了在塞流顶替下获得良好的井眼清洗效果,冲洗液和隔离液主要采用两种体系:一种是具有良好顶替效率的液体体系,如在墨西哥海湾深水固井所用的 VVOR(variable-viscosity, optimized-rheology)隔离液体系、在安哥拉深水固井所用的泡沫隔离液等^[16-17];另一种是具有良好冲刷性能并能提高井壁稳定性的含固相体系,如 Shell 公司的可固化高炉矿渣隔离液体系、Halliburton 公司 Patty 开发的含有波特兰水泥和硅酸盐材料的可固化泡沫隔离液体系^[18-19]。

2.2.2 水泥浆顶替理论

塞流顶替技术是一项适用于松软地层和井下压力安全窗口窄的固井顶替技术,在深水固井中应用广泛。塞流顶替的特点是流体流速剖面非常平缓,顶替液与被顶替液都进行塞流流动时,二者不发生互相掺混,有利于提高顶替效率。目前,有关塞流顶替的研究报道较少,仅 Pelipenko 采用 Hele-Shaw 模型对窄环空、套管居中情况下的塞流顶替进行了数值模拟研究^[20]。

2.3 深水固井设备与工艺

目前,国外深水固井注水泥设备正朝着小型化、自动化和智能化方向发展。在密西西比河峡谷深水区域注泡沫水泥固井作业时,采用了撬装注水泥装置、液体外加剂添加系统、连续监测系统(CMS)和氮气系统,并通过可移动控制中心系统(MCC)将这几部分组合成一个有机整体,实现注水泥作业的实时监测与远程控制^[21]。

在防窜固井工艺方面,墨西哥海湾地区采用水泥脉冲技术来阻止水泥浆在候凝过程中的浅层水-气流动,泰国湾地区使用管外封隔器(ECP)技术来克服浅层气窜等问题^[22]。这些防窜措施效果较好,但施工复杂。

为减少海上移动钻井装置上的固井设备,固井材料的液体化技术也成为研究热点。BJ公司以多功能液体水泥外加剂(MLA)、预混配液体水泥(LCP)并结合液体加料系统(LAS)可准确配制出不同密度的水泥浆以满足不同海洋固井需要。该液体配浆技术减少了固体干混装置,最大限度地消除了环境污染,只在运送的钢罐内残留极少量水泥等材料,便于清洗,也可存在钢罐中待条件许可时再处

理^[23]。

2.4 水泥环长期封隔性能

深水固井所面临的低温、浅层水-气流动、松软地层等问题,以及采油或增产作业过程中所产生的热应力或液压应力,都将严重影响水泥环的长期封隔性能。如果水泥环封隔性能不好,一种情况是高压层流体必然窜入低压层,发生层间窜流现象,造成油气资源不可挽回的流失与浪费,并且对地下环境也构成巨大威胁;另一种情况是地下高压层流体沿水泥环槽通道流动,发生套管流动,产生 SCP 现象,甚至发生套管外井喷,危害油气开采和平台的安全,严重时还会使钻井底盘或平台装置不稳定,造成人员伤亡或失去整个钻井装置设备或平台装置,使油气井完全报废。据美国矿业部内部统计,在美国 14 000 口海洋深水开采井中,有 11 000 口井存在 SCP 现象^[24]。目前,固井工作者已认识到固井水泥环封隔性能差是引起 SCP 现象的主要根源,并开始这方面的研究工作,2002 年公布了“有浅层水流动的深水海域注水泥”的 API 推荐方法(API RP-65),现正准备制订有助于防止 SCP 现象的工程技术措施,其中包括对出现 SCP 现象的补救措施等^[25]。

3 国内深水固井技术

我国深水固井研究工作刚刚起步,相关文献主要是分析深水固井特点和介绍国外深水固井现状^[26-27]。在深水固井工艺研究方面,中国石油大学(华东)已研制出一套集注水泥顶替流动试验、水泥浆失重试验、水泥浆气窜试验等功能为一体的多功能模拟试验装置。该装置由模拟井筒、循环系统、加压系统和数据采集系统 4 大部分组成,可模拟不同井筒角度($0^{\circ} \sim 90^{\circ}$)下环空间隙、偏心度、顶替流速及流态、接触时间、流体性能等因素对顶替效率的影响,也可进行井下压力(≤ 45 MPa)和温度($\leq 120^{\circ}\text{C}$)条件下的水泥浆失重试验和防窜能力评价。

在深水固井水泥浆体系研究方面,目前已开发出可生物降解型油井水泥分散剂和深水低温固井水泥体系^[28-29]。该分散剂属于氨基酸类磺化缩聚物,生物降解能力强,分散能力优异,在 18%, 37% NaCl 溶液中仍具有优良的分散能力,低温下无缓凝副作用。针对深水固井面临的低温、浅层水-气窜等难题,研制出的低温下具有早期强度高、直角稠化、体积微膨胀等优异性能的硫铝酸钙-硅酸盐复合水泥体系,可望有效解决深水固井所面临的困难。

4 深水固井技术研究方向

4.1 固井水泥浆体系

目前用于现场的深水固井水泥浆体系主要以常规固井水泥和水泥外加剂为基础,通过加入低温早强剂和胶凝强度促进剂等来改善水泥浆体系的早期强度和防窜性能。常规固井水泥在低温下水化和硬化能力很弱,常规水泥外加剂本身对水泥的缓凝副作用使得固井水泥浆体系存在早期强度低、防窜能力弱等严重不足,因此研究具有优异低温水化和硬化能力的固井水泥材料、对环境友好并无缓凝副作用的水泥外加剂和低温防窜剂将是固井水泥浆体系研究的突破口。

4.2 注水泥顶替技术

目前对于环空间隙大、地层孔隙压力与破裂压力之间“窗口”窄的注水泥塞流顶替研究还很不完善,并且目前的研究没有考虑低温对注水泥顶替的影响,为此,需进一步加强低温条件下环空间隙大、套管不居中时的塞流数值模拟和试验研究,以及如何形成宽流核、高流速塞流顶替技术的研究。

4.3 注水泥设备和工艺

深水固井注水泥设备正逐渐实现小型化、自动化和智能化,如何实现准确的注水泥参数实时监测与分析处理、注水泥装置的模块式撬装化将成为今后研究重点。注水泥参数的准确监测是实现当量循环密度(ECD)实时控制的关键,ECD 的实时控制对于窄密度“窗口”注水泥作业极其重要。注水泥装置的模块式撬装化可以有效减小装置体积,并且便于搬迁。随着深水固井材料液体化技术的发展,与之配套的注水泥设备和工艺技术研究也是必然的。

4.4 水泥环封隔性能

从深水固井技术发展历程来看,由于早期没有认识到深水地质环境可能会严重影响水泥环封隔性能,因而对水泥环封隔性能研究重视不够。较多深水井在生产过程中地下层间窜流、SCP 现象及套管外井喷事故的发生,促进了对水泥环封隔性能的研究。目前,针对水泥环封隔性能的研究工作刚刚起步,如何建立有效的水泥环封隔性能评价方法、探索影响水泥环封隔性能的因素和如何提高深水固井水泥环的长期封隔性能将是今后研究的关键。

参考文献:

- [1] PHIL Rae, GINO Di Lullo. Lightweight cement formulations for deep water cementing: fact and fiction[R]. SPE

- 91002, 2005.
- [2] PELLETIER J H, OSTERMEIER R M, WINKER C D, et al. Shallow water flow sands in the deepwater Gulf of Mexico: some recent shell experience [R]. International Forum on Shallow Water Flows, League City, Texas, USA, October, 1999.
- [3] ALBERTY M W, HAFLE M E, MINGLE J C. Mechanisms of shallow waterflows and drilling practices for intervention [R]. SPE 56868, 2001.
- [4] AADE. Cementing in deep water [R]. Deepwater Industry Group Meeting, Houston, USA, October 21, 2003.
- [5] RICHARD A M, MICHAEL L P, PETER E. Designer casing for deepwater HPHT wells [R]. SPE 97565, 2005.
- [6] SALIES J B. Evolution of well design in the campos basin deepwater [R]. SPE 52785, 1999.
- [7] LADVA H K J, CRASTER B, JONES T G J. The cement-to-formation interface in zonal isolation [R]. SPE 88016, 2004.
- [8] JOHN Westwood. The outlook for the global subsea industry [R]. The 14th Under Technology Conference, Bergen, Norway, June 8, 2006.
- [9] MOORE S, MILLER M, FAUL R. Foam cementing applications on a deepwater subsalt well-case history [R]. SPE 59170, 2000.
- [10] LANCE E B, ANTHONY V P. Cementing in deep water offshore wells: US, 006244343B1 [P]. 2001.
- [11] BAIREDDY R R, RONALD J C, BRYAN R W. Cementing casing strings in deepwater offshore wells: US, 006273191B1 [P]. 2001.
- [12] STILES D A. Successful cementing in areas prone to shallow saltwater flows in deep-water Gulf of Mexico [R]. OTC 8305, 1997.
- [13] REDDY B R, RUSSELL M F. Cementing casing strings in deepwater offshore wells: US, 006454004B2 [P]. 2002.
- [14] BERNARD P, ALAIN F, SIMON P M. West Africa deepwater wells benefit from low-temperature cements [R]. SPE 67774, 2001.
- [15] KENNETH Hampshire, MIKE Mcfadyen. Overcoming deepwater cementing challenges in South China Sea, East Malaysia [R]. SPE 88012, 2004.
- [16] WHITE J, MOORE S, FAUL R. Foaming cement as a deterrent to compaction damage in deepwater production [R]. SPE 59136, 2000.
- [17] GLEN Benge, DAVID Poole. Use of foamed cement in deep water Angola [R]. SPE 91662, 2005.
- [18] ROBERT B C, MICHAEL W J, BILL W L. Well completion spacer fluids and methods: US, 005789352A [P]. 1998.
- [19] KKULAKOFSKY D, PAREDES J L, MORALES J M. Ultralightweight cementing technology sets world record for liner cementing with a 5.4 lbm/gal slurry density [R]. SPE 98124, 2006.
- [20] FRIGAARD I A, PELIPENKO S. Effective and ineffective strategies for mud removal and cement slurry design [R]. SPE 80999, 2003.
- [21] van ERIC Oort, SANJIT Roy, MARIO Zamora. Real-time ECD simulation and management using a remote operations center [R]. SPE 92605, 2005.
- [22] ASLAKSON J, DOHERTY D, SMALLEY E. Preventing annular flow after cementing, one pulse at a time: offshore Gulf of Mexico cement pulsation field results [R]. SPE 94230, 2005.
- [23] DOHERTY D, FANGUY C, MUELLER D T. Large-scale feasibility determination of storing and transporting a cement slurry below deck under maritime conditions [R]. SPE 98894, 2006.
- [24] NEAL Adams. Causes of underground blowouts [J]. World Oil, 2006, 227(1): 37-42.
- [25] BANNERMAN M, CALVERT J, GRIFFIN T. New API practices for isolating potential flow zones during drilling and cementing operations [R]. SPE 97168, 2005.
- [26] 王建东, 屈建省, 高永会. 国外深水固井水泥浆技术综述 [J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(6): 54-56.
WANG Jian-dong, QU Jian-sheng, GAO Yong-hui. The review of deepwater cementing slurry technology abroad [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005, 22(6): 54-56.
- [27] 王成文, 王瑞和, 卜继勇, 等. 深水固井面临的挑战和解决方法 [J]. 钻采工艺, 2006, 29(3): 11-14.
WANG Cheng-wen, WANG Rui-he, PU Ji-yong, et al. Problems existent in deepwater cementing and its solution [J]. Drilling & Production Technology, 2006, 29(3): 11-14.
- [28] 王成文, 王瑞和, 步玉环. 一种可生物降解油井水泥分散剂及其制备方法: 中国, CN101070233A [P]. 2007-11-14.
- [29] 王成文, 王瑞和, 步玉环. 深水低温固井水泥体系: 中国, CN101054513A [P]. 2007-10-17.

(编辑 李志芬)