

文章编号: 1000-0747(2013)01-0107-04

超高密度水泥浆研制

周仕明^{1,2}, 李根生¹, 王其春²

(1. 中国石油大学(北京); 2. 中国石化石油工程技术研究院)

基金项目: 国家科技重大专项“海相碳酸盐岩固井技术研究”(2008ZX05005-006-04)

摘要: 为了解决贵州赤水地区官渡构造钻探中超高压气层或盐水层固井的技术难题, 通过加重材料优选和颗粒设计研制超高密度水泥浆, 并将其用于官深1井尾管固井。针对超高密度水泥浆配制需求, 选择颗粒呈球形的加重剂MicroMAX并优选了加重剂组合(还原铁粉、铁矿粉、MicroMAX); 基于紧密堆积理论设计了水泥颗粒粒度分布, 实际粒度分布接近紧密堆积的理想状态。设计了密度为2.70~3.00 g/cm³的超高密度水泥浆, 其基本性能、流动性和稳定性良好。在地面模拟混配试验中, 采用常规一次固井流程配制了平均密度为2.71 g/cm³的水泥浆。在官深1井的尾管固井中, 采用设计密度为2.80 g/cm³的水泥浆成功封隔超高压盐水层: 水泥浆入井平均密度为2.78 g/cm³, 最高密度为2.82 g/cm³, 声幅测井显示固井质量合格, 后续作业钻井液密度由2.77 g/cm³降至2.00 g/cm³, 井内稳定。图1表6参11

关键词: 超高密度; 水泥浆; 加重剂; 颗粒设计; 模拟混配试验; 现场应用

中图分类号: TE256.7

文献标识码: A

Research and preparation of ultra-heavy slurry

Zhou Shiming^{1,2}, Li Gensheng¹, Wang Qichun²

(1. China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to resolve the technical problem of cementing when drilling super high-pressure gas layers or saltwater layers of Guandu structure in Chishui region, Guizhou province, an ultra-heavy slurry was developed by optimizing weighting materials and designing particles, and applied to well Guanshen1 for liner cementing. According to the needs of preparing ultra-heavy slurry, the weighting additive MicroMAX in spherical particles was selected and combination of weight additives—reduced iron powder, iron powder, MicroMAX—was chosen for optimization. The particle size-distribution of the slurry was designed on the basis of the theory of tight packing, and the actual particle size-distribution is close to the ideal condition of tight packing. The ultra-heavy slurry with a density of 2.70-3.00 g/cm³ was designed, which is good in basic performance, flow ability and stability. In the simulated mixing test on the ground, a slurry with an average density of 2.71 g/cm³ was prepared by using conventional one-time cementing process. In the liner cementing of well Guanshen 1, the slurry with a density of 2.80 g/cm³ was used to successfully seal the super high-pressure saltwater layer: the average density of the slurry pumped into well was 2.78 g/cm³ and the maximum density was 2.82 g/cm³; amplitude log showed that the cementing quality was good; the well bore kept stable in follow-up drilling when the density of drilling fluid was reduced from 2.77 g/cm³ to 2.00 g/cm³.

Key words: ultra-heavy density; cement slurry; weighting additive; particle design; mixing-test simulation; site application

0 引言

贵州赤水地区官渡构造石炭系茅口组含气层位一直备受关注, 但多次钻探都未能钻达目的层, 主要技术瓶颈在于缺乏超高密度固井水泥浆, 不能克服嘉陵江组的超高压气层或盐水层(地层压力系数达2.7以上^[1]), 导致压稳极为困难。20世纪90年代, 在该构造的官3井钻进至3 808 m时遇高压气层, 采用密度2.87~2.92 g/cm³的超重钻井液压井成功, 但无法进行

常规固井完井作业, 因此只能封井^[2]。2005年, 官7井钻进时遇到超高压盐水层, 由于固井时缺乏超高密度水泥浆, 不得不封井^[3]。

为了研制超高密度水泥浆, 研究人员从水泥浆设计、施工设备改进等方面开展了多次尝试。例如, 为了实现密度2.65 g/cm³超高密度水泥浆的现场配制, 新疆油田专门研制了喷射式二次加重配浆罐, 在霍10井和安4井分别达到了2.61 g/cm³和2.62 g/cm³的水泥浆入井密度^[4], 但该方法不适用于压力较高的地层。本文

通过加重材料优选和颗粒设计研制超高密度水泥浆，并对其性能进行评价；通过地面模拟混配试验对设计的水泥浆的实用性进行检测，并将其应用于官渡构造官深 1 井的固井作业。

1 超高密度水泥浆设计

1.1 球形颗粒加重剂选择

水泥加重剂的颗粒形状对颗粒的粉体性状影响很大，接触角、摩擦角等形状参数决定了加重剂与水泥的掺混能力以及水泥浆的稳定性和流动性。理论上，为防止沉淀，高密度水泥浆所用加重剂的颗粒越小越好，但通过研磨和撞击得到的超细颗粒呈不规则形状，有大量的边角，比表面积过大，容易造成颗粒聚集，且颗粒间的摩擦力大，在加重剂加量增大的情况下，容易引起水泥浆浆体增稠，使浆体流动性变差，还会造成对其他水泥添加剂的不均匀吸附，导致水泥浆性能下降，甚至产生敏感性。例如，微硅加量过大会造成对缓凝剂的过度吸附，使水泥浆的稠化时间与缓凝剂加量不呈线性关系，为延长稠化时间，需要加入比常规情况更多的缓凝剂^[5]。基于上述分析，选用球形颗粒加重剂，其优点包括^[6]：填充量可达到最高，有利于提高浆体的密度；颗粒间摩擦系数小，不会引起浆体增稠，形成的浆体流动性好；表面积比不规则形状颗粒小但足够保持稳定，对其他添加剂的吸附有规律，不会造成过度吸附，水泥浆性能容易调节。

针对超高密度水泥浆配制需求，选择颗粒呈球形的加重剂 MicroMAX，该加重剂主要成分是 Mn₃O₄，平均粒径 0.5 μm，平均相对密度 4.8，比表面积 2~4 m²/g。MicroMAX 不仅具有加重能力，而且在其他加重材料中起到润滑作用，因此可以大幅改善水泥浆的流动性，并且使加重材料各组分的颗粒级配堆积更加合理。对比加 MicroMAX 和不加 MicroMAX 的水泥浆的流动性（见表 1）可以发现：加入 MicroMAX 后，密度为 2.71 g/cm³ 的水泥浆塑性黏度降低了 33.7 mPa·s，密度为 2.80 g/cm³ 的水泥浆塑性黏度降低了 53.5 mPa·s。

表 1 加与不加 MicroMAX 情况下水泥浆流动性对比

水泥浆密度/ (g·cm ⁻³)	加 MicroMAX 情况	流变参数		
		流动特 性指数	稠度系数/ (Pa·s ⁿ)	塑性黏度/ (mPa·s)
2.71	不加 MicroMAX	0.89	0.33	156.5
	加 MicroMAX	0.86	0.34	122.8
2.80	不加 MicroMAX	0.81	0.74	172.5
	加 MicroMAX	0.90	0.26	119.0

注：n—流动特性指数

1.2 加重材料优选及水泥颗粒设计

配制超高密度水泥浆时单独使用任何一种加重剂都不能满足加重要求，必须将两种或两种以上加重剂组合成加重材料。加重材料的纯度和密度越高越好，这样可以在加量较少的情况下获得符合密度要求的水泥浆，并有利于水泥浆各项性能的调节。通过实验室优选，选择还原铁粉、铁矿粉、MicroMAX 等 3 种加重剂作为加重材料（见表 2）。

表 2 超高密度水泥浆加重材料基本特征

名称	主要成分	相对密度	平均粒径/μm	外观
还原铁粉	Fe	7.2	41.0	灰色粉末
铁矿粉	Fe ₂ O ₃	4.9	33.0	褐色粉末
MicroMAX	Mn ₃ O ₄	4.8	0.5	褐色粉末

合理的颗粒大小分布和紧密堆积，可使水泥的孔隙度大幅度下降。紧密堆积理论以颗粒级配（particle size distribution，简称 PSD）技术为依托，采用不同大小级别的颗粒，通过不同尺寸颗粒间的搭配，增加被充填的空间，并提高颗粒间的范德华力^[7-10]。此外，细小颗粒对粗大颗粒能起到滚珠轴承的作用，使配制水泥浆所需的水量减少，而低含水量促进了颗粒间的快速桥接，从而改善了水泥浆的综合性能^[10]。利用 Anderson 连续堆积方程^[11]进行超高密度水泥颗粒设计，使其达到紧密堆积状态。对于加重材料比例为还原铁粉：铁矿粉：MicroMAX = 3：4：3、密度为 2.80 g/cm³ 的超高密度水泥，利用（1）式设计了其粒度分布。该水泥的实际粒度分布曲线与理论最优分布曲线（见图 1）的拟合度较好，接近紧密堆积的理想状态。

$$Y=(D/D_L)^m \tag{1}$$

式中 Y——低于某一粒径颗粒的累计概率，%；D——水泥中颗粒粒径，μm；D_L——水泥中最大颗粒粒径，μm；m——堆积系数，取 0.3。

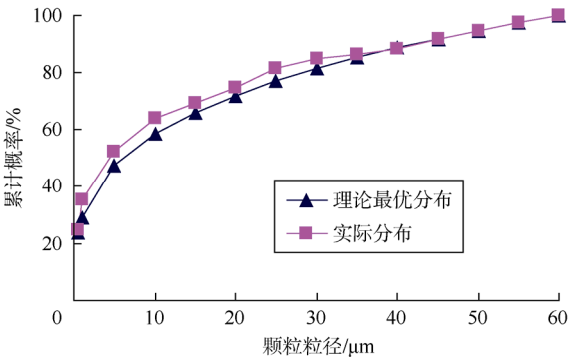


图 1 超高密度水泥浆粒度分布图

1.3 超高密度水泥浆性能评价

采用优选的加重材料及设计的粒度分布，并通过室内实验优选配套的添加剂，设计了密度为 2.70~3.00 g/cm³ 的超高密度水泥浆，并对其基本性能、流动性和沉降稳定性进行了评价。

①基本性能。从表 3 可以看出，设计的 4 种不同

配方超高密度水泥浆的各项基本性能良好：API 滤失量均小于 40 mL；110 °C 下 48 h 抗压强度均大于 18 MPa；75 °C 下 48 h 抗压强度均大于 9 MPa；稠化时间在 255~417 min；流动度均大于 180 mm。

②流动性。从表 4 可以看出，设计的超高密度水泥浆流动性较好，塑性黏度在 108.9~172.0 mPa·s。

表 3 超高密度水泥浆基本性能

序号	温度/°C	密度/(g·cm ⁻³)	API 滤失量/mL	稠化时间/min	抗压强度 (75 °C, 48 h) /MPa	抗压强度 (110 °C, 48 h) /MPa	流动度/mm
1	93	2.70	39	417	13.20	22.0	230
2	93	2.80	37	360	12.80	19.2	220
3	93	2.90	38	255	9.92	19.3	210
4	93	3.00	36	284	12.48	18.5	220

表 4 超高密度水泥浆流动性

序号	温度/°C	密度/(g·cm ⁻³)	流变参数		
			流动特性指数	稠度系数/(Pa·s ⁿ)	塑性黏度/(mPa·s)
1	93	2.70	0.84	0.36	108.9
2	93	2.80	0.86	0.34	122.9
3	93	2.90	0.80	0.74	172.0
4	93	3.00	0.90	0.26	119.0

③稳定性。水泥浆是一种颗粒悬浮液体系，体系的

稳定性是影响固井质量的重要因素之一。在超高密度水泥浆中，由于各材料之间密度差别较大，容易产生轻质材料上浮、重质材料下沉的现象，使水泥浆体系不稳定、不均匀，容易堵塞环空通道，影响固井质量甚至导致固井事故。利用水泥浆沉降稳定仪测量设计的超高密度水泥浆的稳定性（见表 5），结果表明：水泥浆上下最大密度差在 0.016 9~0.032 9 g/cm³，体系稳定性良好。

表 5 超高密度水泥浆稳定性

序号	水泥浆密度/(g·cm ⁻³)	水泥浆柱各位置的密度/(g·cm ⁻³)					上下最大密度差/(g·cm ⁻³)
		1 (顶部)	2	3	4	5 (底部)	
1	2.750 0	2.743 3	2.749 4	2.750 1	2.758 6	2.760 2	0.016 9
2	2.800 0	2.805 5	2.806 1	2.815 2	2.815 5	2.826 3	0.020 8
3	2.930 0	2.910 2	2.918 7	2.914 7	2.923 7	2.933 9	0.023 7
4	3.000 0	2.993 7	2.997 3	3.003 9	3.014 1	3.026 6	0.032 9

2 超高密度水泥浆现场应用

2.1 超高密度水泥浆地面试验

目前国内还没有密度高于 2.65 g/cm³ 水泥浆的入井实例，且相关固井设备密度控制系统的额定最高密度都不超过 2.60 g/cm³。因此，在应用前有必要模拟现场条件进行混配试验，检测设计的超高密度水泥浆以及固井设备泵送水泥浆的能力，为顺利实施固井提供参考。

①混灰工艺。干灰用“层铺”方式小批量混配，即加一次水泥后再加相应比例的加重材料及添加剂，然后再重复这一过程。同时，加大混配供气压力并进行三级混拌，使水泥、加重材料和添加剂充分混合。由于送井过程的颠簸会造成加重材料分层，为模拟这一现象，将混配好的干灰装车在乡村公路行驶 100 km 后再吹入立式储灰罐中。

②地面试验。共进行了 2 次水泥浆地面模拟混配试验。第 1 次试验的水泥浆设计密度是 2.70 g/cm³，混配灰量为 10 t。混灰后，用储灰罐中的干灰配制的水泥浆密度是 2.65 g/cm³，模拟行驶后的密度是 2.64 g/cm³。采用常规一次固井流程，立式储灰罐与水泥车直接连接，由压风机向储灰罐供气，以 0.5 m³/min 的排量配制水泥浆。试配的水泥浆平均密度为 2.60 g/cm³，最高为 2.62 g/cm³，与设计密度相差约 0.10 g/cm³，水泥浆较黏稠，罐内剩 1.8 t 灰不能吹出，试验不成功。第 1 次试验失败的主要原因是混灰过程操作不够精细和供气压力较低（仅为 0.12 MPa），使各材料不能充分混合，加重材料集中在罐底，造成水泥浆密度过低。第 2 次试验改进了混灰工艺，每批次的混灰量比第 1 次试验减半，使用大功率空气压缩机，供气压力提高到 0.20 MPa。试配的水泥浆平均密度为 2.71 g/cm³，最高为 2.72 g/cm³，罐底没有余灰，试验成功。

2.2 超高密度水泥浆在官深 1 井应用

官深 1 井是中国石化西南油气分公司在贵州省赤水地区官渡构造上的 1 口重要勘探井。该井钻至井深 2 955.34 m 时,遇高压盐水层,后采用密度 2.78~2.85 g/cm³ 的钻井液钻进至设计井深 3 700 m,固井前钻井液密度为 2.77 g/cm³。设计下入 $\Phi 273.1$ mm 尾管,尾管位置从 2 750 m 至 3 700 m。固井采用的水泥浆设计密度为 2.80 g/cm³,隔离液、压塞液及保护液的设计密度均为 2.75 g/cm³。表 6 为入井水泥浆和隔离液的性能。

表 6 入井水泥浆和隔离液性能

浆体类型	密度/ (g·cm ⁻³)	塑性黏度/ (mPa·s)	API 滤失量/ mL	稠化时间/ min
领浆	2.800	112	29	670
尾浆	2.800	95	29	313
隔离液	2.755	36	86	

由于遇阻,尾管下至 3 677.5 m。固井时由 1 台双机泵水泥车注隔离液,共注入隔离液 8 m³。注水泥浆时,先由 2 台双机泵水泥车混配水泥浆,再将混好的水泥浆打进过渡罐,然后由 1 台双机泵水泥车注水泥浆。注水泥浆排量为 0.5 m³/min,共注入领浆 8 m³(最大密度 2.82 g/cm³,最小密度 2.76 g/cm³,平均密度 2.79 g/cm³)、尾浆 25 m³(最大密度 2.82 g/cm³,最小密度 2.69 g/cm³,平均密度 2.77 g/cm³)。注替浆排量为 1.0~1.2 m³/min,共注入替浆 74 m³。碰压为 17 MPa 到 22 MPa。起钻 5 柱大排量循环,关井憋压候凝。声幅测井显示固井质量合格,主要高压水层段封固质量为优。扫完水泥塞后下一开钻进前钻井液密度从 2.77 g/cm³ 降至 2.00 g/cm³,井内稳定。

3 结论

设计了密度 2.70~3.00 g/cm³ 的超高密度水泥浆。选择球形颗粒加重剂 MicroMAX,显著改善了水泥浆的流动性;通过实验室优选,选择还原铁粉、铁矿粉和 MicroMAX 作为加重材料;基于紧密堆积理论对水泥的粒度分布进行了设计,实际粒度分布接近紧密堆积的理想状态。

在 2 次地面模拟混配试验中,通过改进混灰工艺,采用常规一次固井流程配制了密度 2.71 g/cm³ 的超高密度水泥浆。

设计的超高密度水泥浆在官深 1 井尾管固井中成功应用。水泥浆入井平均密度为 2.78 g/cm³,最高密度 2.82 g/cm³,成功封固了超高压盐水层,为该井顺利钻达设计井深提供了保障,突破了官渡构造穿越超高压地层的技术瓶颈。

参考文献:

- [1] 胡德云. 赤水地区碳酸盐岩高压深井钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2000, 28(6): 15-17.
Hu Deyun. High-pressure deep well drilling techniques in carbonate formation of Chishui Area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2000, 28(6): 15-17.
- [2] 潘起峰. 官 3 井超高压层重复挤水泥工艺及认识[J]. 石油钻探技术, 1996, 24(3): 27-28.
Pan Qifeng. The cognition of re-squeezing cement in super high pressure layer of well Guan-3[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1996, 24(3): 27-28.
- [3] 张东海, 马洪会. 超高密度钻井液技术在官 7 井的应用[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(5): 8-11.
Zhang Donghai, Ma Honghui. The application of super high-density mud in well Guan-7[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006, 23(5): 8-11.
- [4] 王振昌, 李宝贵, 苏洪生, 等. 霍 10 井超高密度水泥浆固井技术[J]. 钻井液与完井液, 2004, 21(3): 31-33.
Wang Zhenchang, Li Baogui, Su Hongsheng, et al. Super high-density slurry technique of well Huo-10[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2004, 21(3): 31-33.
- [5] 李化建, 黄佳木, 盖国胜, 等. 高纯超细球形化硅微粉的研究[J]. 化工矿物与加工, 2002, 31(9): 17-20.
Li Huajian, Huang Jiamu, Gai Guosheng, et al. Study on high-purity and superfine spherical silica micro powder[J]. Industrial Minerals and Processing, 2002, 31(9): 17-20.
- [6] 张军, 宋守志, 盖国胜. 高纯超细电子级球形石英粉研究[J]. 电子元件与材料, 2004, 23(1): 24-27.
Zhang Jun, Song Shouzhi, Gai Guosheng. Study on high-purity and superfine electronic-grade spherical quartz powder[J]. Electronic Components & Material, 2004, 23(1): 24-27.
- [7] 黄柏宗. 紧密堆积理论优化的固井材料和工艺体系[J]. 钻井液与完井液, 2001, 18(6): 1-8.
Huang Baizong. Cementing material and process system optimized by theory of tightly packing[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2001, 18(6): 1-8.
- [8] 周仕明, 魏娜, 陈玉辉. 紧密堆积水泥浆体系的堆积率计算[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(4): 46-49.
Zhou Shiming, Wei Na, Chen Yuhui. Accumulation rate calculation of closely stacked cement slurry system[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(4): 46-49.
- [9] 林志辉, 王贵宏, 李志斌, 等. 超高密度抗盐水泥浆体系的研究[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(B05): 59-62.
Lin Zhihui, Wang Guihong, Li Zhibin, et al. Study on ultra high density salt-resisting cement slurry system[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005, 22(B05): 59-62.
- [10] 张清玉, 邹建龙, 谭文礼, 等. 国内外高温深井固井技术研究现状[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(6): 57-61.
Zhang Qingyu, Zou Jianlong, Tan Wenli, et al. Research status of high-temperature deep well cementing technology at home and abroad[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005, 22(6): 57-61.
- [11] 齐奉忠, 庄晓谦, 唐纯静. CemCRETE 水泥浆固井技术概述[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(6): 68-70.
Qi Fengzhong, Zhuang Xiaoqian, Tang Chunjing. Overview of CemCRETE slurry technology[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006, 23(6): 68-70.

第一作者简介:周仕明(1972-),男,安徽和县人,中国石化石油工程技术研究院教授级高级工程师,主要从事固井材料与深井复杂地层固井工艺技术研究。地址:北京市朝阳区北辰东路 8 号北辰时代 520 室,中国石化石油工程技术研究院,邮政编码:100101。E-mail:zhousm.sripe@sinopec.com
收稿日期:2011-09-28 修回日期:2012-10-28

(编辑 胡苇玮 绘图 刘方方)