

# 深水表层固井硅酸盐水泥浆体系研究

王晓亮<sup>1</sup> 许明标<sup>1</sup> 王清顺<sup>2</sup> 林 平<sup>1</sup> 王 浪<sup>3</sup>

(1. 长江大学 石油工程学院,湖北 荆州 434023;2. 中海油田服务股份有限公司,北京 101149;3. 中国石油渤海钻探工程有限公司 第二固井公司,天津 大港 300280)

**摘 要:**针对海洋深水表层套管固井作业,介绍了一种密度可调(1.20~1.80 kg/L)的低温低密度 G 级硅酸盐水泥浆体系。对低温低密度 G 级硅酸盐水泥浆体系的设计原理与水泥浆组分以及不同密度水泥浆配方进行了详细的论述,并对该水泥浆体系在深水环境下的性能进行了评价。结果表明,低温低密度 G 级硅酸盐水泥浆体系在低温环境下具有较高早期强度、低失水量以及良好的流变性和稠化性能,其中密度为 1.20 kg/L 的水泥浆在 3℃ 温度下的稠化时间≤560 min,稠化过渡时间≤60 min,API 失水≤70 mL,水泥石在 5℃ 温度下养护 24 h 后的抗压强度≥3.5 MPa。这表明低密度 G 级硅酸盐水泥浆体系具有良好的低温性能,能够满足海洋深水表层套管固井作业要求。

**关键词:**深水;固井;水泥浆;低温;水泥浆性能;抗压强度

**中图分类号:**TE256<sup>+</sup>.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2010)06-0011-04

## Research on G-Class Portland Cementing Slurry in Surface Casing in Deep Water

Wang Xiaolian<sup>1</sup> Xu Mingbao<sup>1</sup> Wang Qingshun<sup>2</sup> Lin Pin<sup>1</sup> Wang Lang<sup>3</sup>

(1. College of Petroleum Engineering ,Yangtze University ,Jingzhou, Hubei, 434023, China; 2. China Oilfield Company Limited ,Beijing, 101149, China; 3. Second Cementing Company ,Bohai Drilling Engineering Co. ,Ltd. ,CNPC,Dagang, Tianjin, 300280, China)

**Abstract:** This article introduced G-class Portland cement system with adjustable density (1.2~1.8 g/cm<sup>3</sup>) and low temperature and low density considering the cementing task in surface casing in deep water. After analysis it showed that G-class Portland cementing slurry system had high early strength, low fluid loss, good rheological and good thickening properties. The thickening time was less than 560 minutes; the thickening transition time was less than 60 minutes, and the fluid loss was less than 70 mL for cement slurry with density of 1.20 g/cm<sup>3</sup> at 3℃. The strength of cementing slurry was higher than 3.5 MPa after 24 h curing at 5℃. All these show that this low-density G-class Portland cementing system can meet the requirements of cementing operation for surface casing in deep water.

**Key words:** deep water; well cementing; cement slurry; low temperature; cement slurry property; compressive strength

海洋水深大于 350 m 的水域称之为深水。海洋深水表层套管固井作业地层具有低温、地层破裂压力低以及浅层水流突出的特点。固井水泥浆的设计难点主要体现在以下几点<sup>[1-6]</sup>:1)海水深度大于 1 000 m 后海底循环温度较低(通常只有几摄氏度),常规固井水泥的水化凝固性能难以满足低温水化的要求;2)海底泥线下地层破裂压力低,需采用低密度水泥浆体系固井;3)泥线下地层存在高压浅层盐水等流

体,要求水泥浆体系具有优良的凝固特征,以抑制浅层水流灾害的产生。

**收稿日期:**2010-06-01;**改回日期:**2010-10-08

**基金项目:**国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“深水表层钻井关键技术及装备研究”(编号:2007AA09A103)部分研究内容

**作者简介:**王晓亮(1982—),男,安徽亳州人,2007 年毕业于长江大学石油工程专业,在读硕士研究生。

**联系方式:**(0716)8060863, wangxiaoliang031@163.com

笔者通过对 G 级水泥、南海海水、CG88L 降失水剂、WL-18 微珠减轻剂、CF44L 分散剂以及 H21L 缓凝剂与 PF-6 增强剂等固井材料的优化组合,构建了一套低温低密度 G 级硅酸盐水泥浆体系。该水泥浆体系具有低温早期强度高以及低温稠化时间可控的特点,可解决 G 级硅酸盐水泥浆在低温( $\leq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、低密度下早期强度低与防窜性能差的难题。

## 1 水泥浆配方设计

### 1.1 水泥浆设计原理

G 级硅酸盐水泥应用于深水环境面临着诸多问题,最为突出的是低温低密度条件下水泥石强度发展缓慢,存在长时间难以固化现象。笔者认为要解决该问题需从以下 3 个方面着手:

1) 使用有机早强剂与无机早强剂组合而成的高效早强剂,提高硅酸盐水泥低温下的水化速率,促使水泥浆在较短时间内凝固。

2) 使用低密度高性能减轻剂,有效增加水泥等凝胶材料在水泥浆中所占比例。深水表层固井水泥浆受地层破裂压力低的限制,需要使用密度减轻剂。故在设计水泥浆时,需选用耐高压低密度减轻剂,以增强密度减轻效果,提高水泥等凝胶材料在水泥浆中所占比例,促进水泥石强度发展,另外,耐高压密度减轻剂能够为水泥石贡献有效的支撑强度,相对提高低密度水泥浆的早期强度。

3) 降低水泥石渗透率,提高水泥石强度。低温低密度硅酸盐水泥浆中存在多种固体颗粒,颗粒之间存在空隙,在水泥浆固化后,这些空隙将影响水泥石的渗透率和强度。为提高水泥石的强度,降低其渗透率,在低温低密度硅酸盐水泥浆体系中,需加入性能良好的增强剂。该增强剂应包括活性填充剂材料与惰性填充剂材料,活性填充材料为具有水化活性的超细颗粒,能够促进水泥颗粒水化,有效填充颗粒间的空隙;而惰性填充材料也能够更有效地填充颗粒间的空隙。加入由这两种填充材料复配成的增强剂,能够提高水泥石的致密性与早期强度。

### 1.2 水泥浆组分

深水硅酸盐水泥浆体系由 G 级水泥、南海海水、CG88L 降失水剂、WL-18 微珠减轻剂、CF44L

分散剂、H21L 缓凝剂、PF-6 增强剂共同组成。其中 G 级水泥为四川嘉华生产的高抗硫 G 级硅酸盐水泥;CG88L 降失水剂是 AMPS 类聚合物降失水剂,相对分子质量为  $(10\sim 200)\times 10^5$ ;WL-18 减轻剂为中空硅硼酸钙盐类微珠,呈低碱性,密度为  $0.42\text{ kg/L}$ ,在压力  $70\text{ MPa}$  下微珠的残活率在 90% 以上;CF44L 分散剂是聚苯乙烯磺酸盐溶液和 NA-1、SSE-1、SAE-2 等的混合物(其中聚苯乙烯磺酸盐溶液为主要成分,NA-1、SSE-1 以及 SAE-2 均为低温促凝剂);H21L 缓凝剂是低分子有机磷酸盐;出于简化水泥浆配方、方便现场施工的考虑,笔者预先将低温促凝剂与低温增强剂进行混配,制备成含有低温促凝剂的深水低温增强剂 PF-6,主要由超细矿渣、超细 G 级水泥和 SAE-2 及 CO-2 等共混而成(其中超细水泥和超细矿渣在水泥浆中作为活性填充材料,CO-2 为惰性填充材料,SAE-2 为低温促凝剂);配浆海水为中国南海深海海水。

### 1.3 水泥浆配方

由于海底沉积岩层形成时间较短,缺乏足够的上覆岩层,地层结构疏松,破裂压力较低,通常要采用低密度水泥浆来封固深水表层。不同深水地层的破裂压力存在差异性,在固井时需针对封固地层的破裂压力设计相应的水泥浆密度,以达到最佳封固效果。考虑到深水表层套管固井时,水泥浆需求量较大,为保障水泥浆安全泵送,在设计水泥浆配方时,要求将水泥浆  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  的稠化时间控制在  $300\text{ min}$  左右。在室内设计配方时通过适当调整缓凝剂 H21L 的加量来控制水泥浆的稠化时间,通过调节水泥浆中减轻剂、增强剂以及海水所占比例,确定密度  $1.20\sim 1.80\text{ kg/L}$  的水泥浆配方如下:

密度  $1.20\text{ kg/L}$  水泥浆配方为嘉华 G 级水泥 +  $100.00\%$  海水 +  $25.00\%$  PF-6 +  $0.01\%$  H21L +  $3.00\%$  CF44L +  $33.00\%$  WL-18 +  $5.00\%$  CG88L;

密度  $1.40\text{ kg/L}$  水泥浆配方为嘉华 G 级水泥 +  $70.00\%$  海水 +  $22.00\%$  PF-6 +  $0.02\%$  H21L +  $3.00\%$  CF44L +  $18.00\%$  WL-18 +  $5.00\%$  CG88L;

密度  $1.50\text{ kg/L}$  水泥浆配方为嘉华 G 级水泥 +  $61.00\%$  海水 +  $20.00\%$  PF-6 +  $0.02\%$  H21L +  $3.00\%$  CF44L +  $13.00\%$  WL-18 +  $5.00\%$  CG88L;

密度  $1.60\text{ kg/L}$  水泥浆配方为嘉华 G 级水泥 +  $57.00\%$  海水 +  $18.00\%$  PF-6 +  $0.03\%$  H21L +  $3.00\%$  CF44L +  $9.00\%$  WL-18 +  $5.00\%$  CG88L;

密度  $1.70\text{ kg/L}$  水泥浆配方为嘉华 G 级水泥 +

53.0%海水 + 18.0% PF-6 + 0.1% H21L + 3.0% CF44L + 5.0% WL-18 + 5.0% CG88L;

密度 1.80 kg/L 水泥浆配方为嘉华 G 级水泥 + 50.0%海水 + 18.0% PF-6 + 0.1% H21L + 3.0% CF44L + 2.5% WL-18 + 5.0% CG88L。

2 水泥浆性能评价

2.1 试验设备与方法

2.1.1 试验设备

高低温增压稠化仪,长江大学与沈阳金欧科石油设备制造有限公司共同制造,温度可控范围 0~315 ℃,压力可控范围 0~275 MPa;

高低温增压养护釜,长江大学与沈阳泰格石油设备制造有限公司共同制造,温度可控范围 0~250 ℃,压力可控范围 0~30 MPa;

水泥浆密度计 2 台,青岛海通达专仪器厂生产,

测量范围分别为 0.10~1.50 和 0~3.00 kg/L,最小刻度 0.01 kg/L;

YAW-300C 型抗压试验机,济南中路昌试验机制造有限公司生产;

OWC-9360 型水泥浆混浆搅拌器,沈阳航空工业学院生产。

2.1.2 试验方法

参照深水固井试验标准 API 10B-3—2004 制备水泥浆并测定水泥浆的性能和水泥石抗压强度。

2.2 水泥浆的低温稠化性能

G 级硅酸盐水泥浆用于深水固井的难点在于封固低温井段时水泥浆的稠化时间难以控制,存在稠化困难的现象。为考察低温低密度 G 级硅酸盐水泥浆在深水低温环境下的稠化时间与稠化过渡时间,对水泥浆在低温下的稠化性能进行了测试,结果见表 1。

表 1 水泥浆在低温下的稠化时间与稠化过渡时间					
Table 1 Slurry thickening and thickening transition time at low temperature					
水泥浆密度/kg·L <sup>-1</sup>	3 ℃稠化时间/min	7 ℃稠化时间/min	10 ℃稠化时间/min	15 ℃稠化时间/min	稠化过渡时间/min
1.20	560	355	298	248	48~60
1.40	620	359	356	242	52~58
1.50	529	324	328		45~39
1.60	690	376	299	259	40~52
1.70	610	435	339	264	42~48
1.80	680	417	315	248	39~50
1.90	900(未稠化)	900(未稠化)	900(未稠化)	847	228

注:水泥浆的稠化试验压力为 30 MPa;密度 1.90 kg/L 水泥浆配方为 100%G 级水泥+5%CG88L+42%海水+1%CF44L,下同。

水泥浆的稠化过渡时间是指水泥浆在一定温度与压力下由液态转变为固态这一过程(通常指水泥浆稠度由 30 Bc 过渡到 100 Bc)所经历的时间。它能客观反应低温低密度水泥浆抵抗可能存在的浅层水流窜的能力,稠化过渡时间越短抗流体窜的能力就越强。从表 1 可以看出:1)密度 1.20~1.80 kg/L 水泥浆在 3 ℃温度下能够稠化且稠化时间在 12 h 以内,有利于水泥浆获得高早期强度;2)同密度水泥浆随温度升高其稠化时间呈逐渐缩短趋势,能够保证在候凝时间内水泥浆液柱压力顺利传导,有助于平衡地层压力、抑制水气上窜;3)各密度水泥浆在低温环境下,稠化过渡时间均能够控制在相对较短的时间内,能一定程度上防止流体侵入水泥环<sup>[7]</sup>。

2.3 水泥石的低温抗压强度

水泥浆候凝时间越短越有利于其早期强度的发

展。水泥浆能够在较短时间内获得较高的强度,有利于后续钻进更快地进行,有助于降低钻井成本。为考察低温低密度 G 级硅酸盐水泥浆的强度发展情况,对密度 1.20~1.80 kg/L 水泥浆所形成水泥石在 5、10、15 ℃水浴中养护 12、24 h 的抗压强度进行了测试,同时设定一组未加入增强剂的密度 1.90 kg/L 水泥浆与低密度 G 级硅酸盐水泥浆进行比较,结果见表 2。

从表 2 可以看出:在相同养护条件下,密度为 1.90 kg/L 的水泥浆所形成水泥石的抗压强度均小于低密度水泥浆所形成水泥石的抗压强度,可见低密度 G 级硅酸盐水泥浆所形成水泥石在低温下抗压强度发展更快;随养护温度升高,同密度水泥浆所形成水泥石的抗压强度呈升高趋势,其中密度为 1.20 kg/L 的水泥浆所形成的水泥石在 5 ℃下养护 24 h 后的抗压强度能达到 3.52 MPa,已能支撑套

表 2 水泥石抗压强度与养护温度和时间的关系  
Table 2 Different slurry intensity under different conservation temperature and time

水泥浆密度/ kg · L <sup>-1</sup>	水泥石抗压强度/MPa					
	5 ℃		10 ℃		15 ℃	
	12 h	24 h	12 h	24 h	12 h	24 h
1.20	1.85	3.52	3.24	4.89	4.12	7.08
1.40	1.79	3.86	3.58	5.86	4.26	7.58
1.50	2.14	4.22	3.72	6.48	4.45	8.29
1.60	1.76	3.78	3.65	5.96	4.68	7.21
1.70	1.92	4.12	3.72	6.08	4.89	8.12
1.80	1.84	3.68	3.99	6.36	5.11	8.89
1.90		0	0.69	1.09		1.84

管所形成的轴向载荷,满足继续钻进的要求<sup>[8]</sup>。

对于低温低密度 G 级硅酸盐水泥浆能够在低温下取得较高早期强度的原因,笔者分析可能有以下 3 点:1)所用 WL-18 减轻剂耐压性较好(70 MPa 压力下破损率≤10%),只要胶凝材料固化并达到一定强度,减轻剂颗粒与胶凝材料共同构建的水泥石结构就能够支撑一定强度的外来载荷;2)所用增强剂是低温早强剂和活性胶凝材料的混合物,在早强剂与活性增强颗粒的协同作用下,G 级水泥的水化进程得到缩短,水泥石的早期强度得到相应提高;3)增强剂的主要成分矿渣和超细 G 级水泥都具有低温强水化活性,在低温下能够快速水化、固化,加速水泥石强度的发展。

2.4 水泥浆的其他性能

在室内对深水硅酸盐水泥浆在 10 ℃ 温度下的密度、API 失水、自由液、水泥浆上下密度差以及水泥浆的流变参数进行了测试,结果见表 3。

表 3 水泥浆在低温下的主要性能  
Table 3 Key performances of slurry under low temperature

密度/ kg · L <sup>-1</sup>	API 失水/ mL	自由液/ mL	上下密度差/ kg · L <sup>-1</sup>	n	K/ Pa · s <sup>n</sup>
1.20	67	0	0.01	0.71	1.48
1.40	68	0	0.01	0.76	0.97
1.50	48	0	0	0.71	1.30
1.60	42	0	0.01	0.81	0.85
1.70	38	0	0.01		
1.80	42	0	0.01	0.73	1.11

采用性能优良的 CG88L 聚合物作为水泥浆降失水剂,水泥浆的失水得到较好控制。CG88L 聚合

物具有较好的护胶作用,其与水泥浆中微细颗粒共同作用,保证了水泥浆浆体的稳定性并避免自由液的产生。从表 3 可以看出,不同密度 G 级硅酸盐水泥浆的失水、稳定性及自由液等性能均能得到较好控制。

3 结论与建议

1) 低温低密度 G 级硅酸盐水泥浆具有较好的稳定性和稠化可控性,便于施工,有利于节约井场作业时间。

2) 低温低密度 G 级硅酸盐水泥浆具有低温早期强度高和失水量低的特点,能够充分满足深水表层固井作业需求。

3) 低温低密度 G 级硅酸盐水泥浆主要的凝胶材料为 G 级油井水泥,来源较为广泛,成本低,应用前景广阔。

4) 低温低密度 G 级硅酸盐水泥浆的稠化过渡时间仅控制在 60 min 内,有必要进一步改进,以期达到近直角稠化,使水泥浆具有更为优异的性能。

参 考 文 献

[1] Ravi K,Biezen E N,Lightford S C,et al. Deepwater cementing challenges [R]. SPE 56534,1999.

[2] Armstrong L J,Jean P,Puz G. Deepwater development environmental issues and challenges [R]. SPE 73873,2002.

[3] Rae P,Gino Di Lullo. Lightweight cement formulations for deep water cementing:fact and fiction [R]. SPE 91002,2004

[4] Boncan G. Methods and compositions for use in cementing in cold environments;US.6626243[P]. 2003-09-30.

[5] Watson P,Kolstad E,Borstmayer R,et al. An innovative approach to development drilling in deepwater Gulf of Mexico [R]. SPE/IADC 79809,2003.

[6] Jenkins R W,Schmidt D A,Stokes D,et al. Drilling the first ultra deepwater wells offshore Malaysia [R]. SPE/IADC 79807, 2003.

[7] 许明标,曾晶,唐海雄,等. 适于海洋深水固井的零稠化转化时间低温水泥浆体系研究[J]. 石油天然气学报,2007,29(3):104-107.

Xu Mingbiao,Zeng Jing,Tang Haixiong,et al. Research on a cement slurry for deepwater cementing operation in zero thickening transition period at low temperature[J]. Journal of Oil and Gas Technology,2007,29(3):104-107.

[8] 刘崇建,黄柏宗. 油气井注水泥浆理论与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2001:62-64.

Liu Chongjian,Huang Baizong. Oil and gas wells pumping slurry theory and application [M]. Beijing: Petroleum Industry Press,2001:62-64.