

# 新型低密度水泥浆体系在大庆油田深层气井中的应用

赵常伟

(大庆钻井生产技术服务一公司, 黑龙江 大庆 163413)

**摘要:**针对常规漂珠的批量生产限制、承压能力差,非漂珠低密度水泥浆体系密度可控范围窄、低温强度低等问题,进行了新型深井高强低密度水泥浆体系的研究。选用新型高承压人造空心微珠作为主减轻剂,以颗粒的合理级配及紧密堆积为理论基础,通过水泥石抗压强度、水泥浆沉降稳定性等试验优选了DC-1、DC-2外掺料,并确定最优配比。复配外加剂体系后,研制出密度为 $1.30 \sim 1.40 \text{ g/cm}^3$ 的低密度水泥浆体系,具有密度低、强度高、稳定好等特点。该体系泥浆在大庆油田徐家围子区块肇深19井成功应用,取得较好的效果,具有良好的推广应用前景。

**关键词:**易漏井;固井;人造空心微珠;低密度水泥浆;深层气井

**中图分类号:**TE256 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)08-015-04

**Application of New Low Density Cement Slurry System in Deep Gas Well of Daqing Oilfield/ZHAO Chang-wei**  
(Daqing No. 1 Drilling Production and Technology Service Company, Daqing Heilongjiang 163413, China)

**Abstract:** According to the problems of conventional floating bead about mass production limit, poor resistance to pressure and non floating bead about narrow controllable range and low temperature strength, the study was made on high compressive strength and low density cement slurry system for new deep well. New high pressure artificial cenospheres were selected as density reducer, on the theoretical basis of reasonable gradation of particles and dense packing and by the cement compressing strength and cement slurry sedimentation stability tests, DC-1 and DC-2 additives were optimized and the optimal proportion was determined. With the additive system completion, new cement slurry system of  $1.30 \sim 1.40 \text{ g/cm}^3$  was developed with the characteristics of low density, high compressive strength and good sedimentary stability, this slurry system was applied in Zhaoshen well 19 in Xujiaweizi block of Daqing oilfield. The good application effects show its good popularization and application prospect.

**Key words:** circulation lost well; well cementing; artificial cenosphere; low density cement slurry; deep gas well

## 0 引言

目前,国内常用的低密度水泥浆体系主要有普通漂珠低密度体系和非漂珠低密度体系2种。漂珠低密度体系由于工业漂珠承压能力差,在井下易发生破裂、渗水,导致井下水泥浆密度升高,不适合深井应用。另外,由于漂珠是发电厂的工业副产品,随着对环境保护要求力度的增大,发电厂烟道排放设施的改进,目前漂珠的产量已经日趋减少,最终将停止对漂珠这种副产品的生产。非漂珠低密度体系虽然应用安全性较高,但该类体系存在以下两方面缺点:第一,水泥浆下限密度只能达到 $1.40 \text{ g/cm}^3$ ,不能满足破裂压力更低井的封固要求;第二,由于体系内水泥所占比例较小,水泥石抗压强度无法与漂珠低密度水泥浆体系相媲美,特别是在大温差固井条件下,很难保证低温段水泥石强度,固井质量难以保

证。

人造空心玻璃微珠是一种中空圆球粉末状超轻质无机非金属材料,是近年发展起来的一种用途广泛、性能优异的新型轻质材料。其密度在 $0.15 \sim 0.60 \text{ g/cm}^3$ ,美国3M公司生产的HGS18000型微珠最高承压能力达到124 MPa。目前该产品的生产工艺已经实现了国产化,大幅度降低了应用成本。因此,有必要研制一种能够兼具以上2个体系优点(密度低、承压能力高)的新型低密度水泥浆体系,以适合勘探开发日益提高的技术需求。

## 1 室内实验

### 1.1 水泥外掺料的优选

#### 1.1.1 主减轻剂的评价优选

本研究采用人造空心玻璃微珠作为体系主减轻

收稿日期:2015-11-06; 修回日期:2016-06-01

作者简介:赵常伟,男,汉族,1980年生,石油工程专业,主要从事固井施工及水泥浆体系的研究及工程应用工作,黑龙江省大庆市红岗区张铁匠钻井生产技术服务一公司, zcw323@163.com。

剂。该微珠为硼硅酸盐材质,根据应用井型要求,产品型号不同,密度 $0.40 \sim 0.60 \text{ g/cm}^3$ ,承压能力为 $30 \sim 80 \text{ MPa}$ 。为检测不同型号的微珠的承压能力,进行承压能力实验。

实验方法:采用高温高压稠化仪对相同密度的低密度水泥浆进行加压测试,对比加压前后水泥浆密度的变化情况,验证空心微珠承压能力(见表1)。

表1 不同微珠承压能力对比

微珠种类	水泥浆 密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	实验 压力/ MPa	稳压 时间/ min	加压后水 泥浆密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	破裂 压力/ MPa
工业微珠	1.40	20	20	1.55	5.0
W-40	1.40	20	20	1.40	28.0
W-46	1.40	20	20	1.40	32.0
W-60	1.40	20	20	1.40	82.0

在进行普通工业微珠的实验过程中,压力不断下降,说明微珠发生破碎。实验结束后,水泥浆密度上升至 $1.55 \text{ g/cm}^3$ ,证明该类微珠在高压下发生破裂、渗水,实际应用中存在井下密度高于设计密度的情况,增大井漏风险。W-60型人造微珠的承压能力可达到 $82 \text{ MPa}$ ,能够满足井深 $5000 \text{ m}$ 以深井的应用要求。因此,人造空心微珠是一种解决深层易漏井固井问题的新型减轻材料。

### 1.1.2 其它外掺料的评价优选

为保证水泥浆具有良好的稳定性、更低的渗透率、更高的水泥石强度,优选出DC-1和DC-2两种外掺料,以上两种外掺料选择时除考虑功能性,同时考虑了颗粒粒径及加量(粒径比在 $1/2.5 \sim 1/10$ 范围内,填充物加量为被填充物体积的 $18\% \sim 27\%$ ),以实现颗粒的紧密堆积。DC-1是另一种减轻材料,密度 $2.0 \text{ g/cm}^3$ ,能够参与水化反应,可替代部分水泥,降低人造微珠加量(成本较高),从而降低成本;DC-2是一种超细材料,具有良好的悬浮能力,可提高浆体的稳定性。至此,确定体系由水泥、人造微珠、DC-1、DC-2组成,属于四级颗粒级配体系。

通过正交实验,确定以上物料的最优比例。通过调节外掺料的加量比例及水固比,可配置出密度范围在 $1.30 \sim 1.40 \text{ g/cm}^3$ 的低密度水泥浆体系。

### 1.2 外加剂的评价优选

优选低密度水泥配套外加剂的主要考虑因素有:外加剂的抗温能力、水泥石强度、水泥浆沉降稳定性、外加剂对加量及温度的敏感性等。目前,用于

深井固井的外加剂体系主要有胶乳体系和AMPS类降失水剂体系。

实验表明,胶乳体系与低密度水泥外掺料反应后会产生大量气泡,且难以消除,另外水泥浆稳定性较差(密度差达到 $0.15 \text{ g/cm}^3$ ),因此确定选用DPF-2(AMPS类)水泥外加剂体系作为该低密度水泥浆的配伍外加剂。

水泥浆在高温条件下,AMPS类降失水剂体系一般会出现“高温稀释”现象,在低密度水泥浆体系中,该现象被放大,使浆体稳定性变差。因此,有必要优选与体系配伍的高温稳定剂,保证高温条件下浆体的悬浮稳定性。本项目优选出以下2种稳定剂,WD-1属于大分子有机材料,抗温 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ,固体粉末,其作用机理是大分子材料水解后,能够提高浆体的粘度和切力,从而提高浆体的悬浮能力;WD-2的主要成分属于无机超细材料,将其分散于水中,形成的乳液。该稳定剂主要是依靠大量的超细颗粒,吸附周围的固体颗粒和自由水,提高浆体的稳定性。通过进行水泥浆稳定性、流动度、混灰时间、抗压强度等性能的对比,确定WD-2作为体系稳定剂。2种稳定剂性能对比见表2。

表2 不同稳定剂对水泥浆稳定性的影响

稳定剂 种类	加量/ %	流动度/ cm	混灰时间/ s	抗压强度/ MPa	水泥石上下密度 差/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
WD-1	2.0	18	45	18.0	0.040
WD-1	2.5	16	60	17.8	0.020
WD-2	3.0	23	20	18.8	0.010
WD-2	4.0	21	30	20.6	0.005

注:(1)水泥浆密度 $1.30 \text{ g/cm}^3$ ,外加剂为DPF-2体系,加量 $1.2\%$ ;(2)抗压强度养护条件为常压;(3)稳定性实验:使用沉降管, $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下养护成水泥石后,测上下水泥石密度,取最大值。

从表2可以看出,WD-1型稳定剂随加量增加,浆体悬浮能力提高,但对混灰相对困难,浆体流动性不好;而WD-2型稳定剂在悬浮性能、水泥浆流动性、水泥石抗压强度都优于WD-1型,而且混灰速度提高,利于现场施工排量的控制,因此确定WD-2作为体系的稳定剂。确定外加剂体系和稳定剂后,优选出早强剂、消泡剂和分散剂等外加剂助剂。

### 1.3 综合性能评价

确定体系外掺料和外加剂种类及加量后,进行不同温度、缓凝剂加量下的水泥浆综合性能评价,各项性能见表3。水泥浆配方:G级水泥+30%DC-1

+5% DC - 2 + 30% 人造微珠 + 3% 稳定剂 + 1.2% 降失水剂 + 0.01% 消泡剂。

注:(1)水泥为大连 G 级水泥,水泥浆密度 1.30 g/cm<sup>3</sup>; (2)抗压强度实验条件为:实验压力 20.7 MPa,实验时间 48 h。

表 3 不同温度下水泥浆性能数据

缓凝剂/ %	流动度/ cm	游离液/ mL	初始稠度/ Bc	稠化时间/[min · (100 Bc) <sup>-1</sup> ]			滤失量/[mL · (30 min) <sup>-1</sup> ]		
				80 °C	100 °C	120 °C	80 °C	100 °C	120 °C
0.00	21.6	0	16	220	170	144	30	38	42
0.05	22.0	0	17	267	236	175	30	38	44
0.10	21.8	0	15	322	292	220	34	40	44
0.15	23.0	0	16	379	349	262	36	44	48

由表 3 中数据可以看出,不同实验温度下,水泥浆滤失量都能控制在 50 mL 以内,随着缓凝剂加量的增加,稠化时间的延长具有一定的线性关系,随着养护温度的升高,水泥抗压强度不断增大,水泥浆流动性、游离液及流动度等性能达到应用指标要求,且体系的稠化曲线具有近似直角稠化的特点(见图 1)。

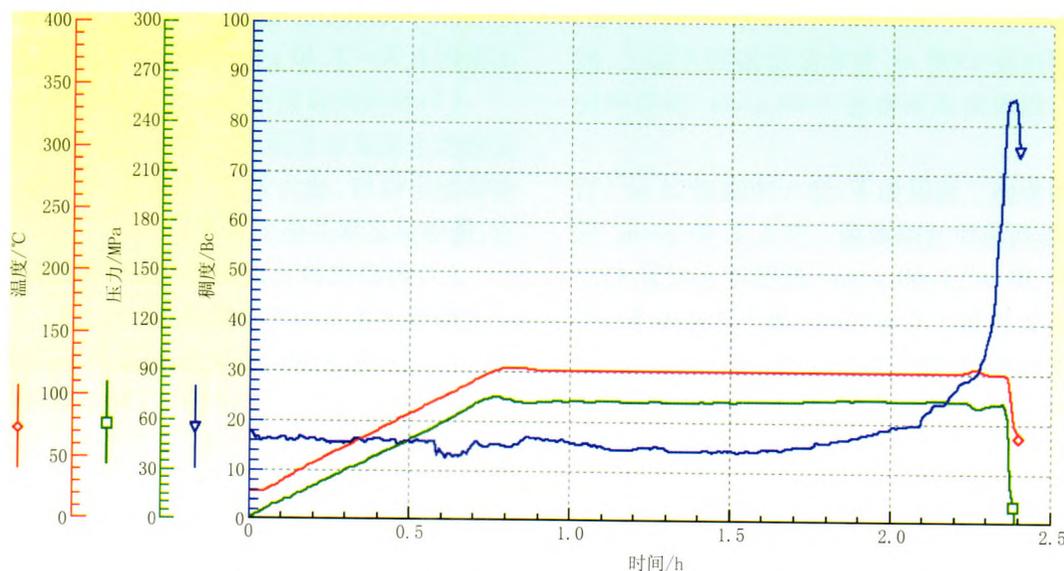


图 1 低密度(1.30 g/cm<sup>3</sup>)水泥浆 120 °C 稠化曲线

水泥石具有长期稳定的强度是确保油井固井质量的重要因素之一,为了进一步验证水泥石长期强度发展规律,针对不同温度、不同养护龄期进行了水泥石抗压强度实验。实验数据见表 4。

表 4 不同养护龄期水泥石强度实验

缓凝剂/ %	抗压强度/MPa								
	40 °C			80 °C			120 °C		
	养护期龄			养护期龄			养护期龄		
	2 d	5 d	7 d	2 d	5 d	7 d	2 d	5 d	7 d
0.00	18.8	20.2	23.3	27.4	29.0	31.4	30.8	34.8	35.2
0.05	16.5	19.8	22.5	25.0	27.2	30.8	27.3	31.7	33.9
0.10	16.0	18.6	21.0	23.5	26.7	30.5	26.8	29.3	32.6
0.15	15.2	18.0	19.8	21.6	24.0	29.0	25.4	28.4	30.0

注:(1)水泥浆密度 1.30 g/cm<sup>3</sup>; (2)抗压强度实验养护压力为 20.7 MPa。

由表 4 可以看出,该体系水泥石在低温条件下仍具有较高的抗压强度。随着养护温度的升高、养护期龄的延长不断增大,养护温度越高,缓凝剂及养护期龄的影响越弱,这是由于高温条件下,外掺料 DC - 1 和 DC - 2 的活性被激活,参与水化反应的速

度加快的原因。另外,在不附加石英砂的条件下,该体系在高温(120 °C)时具有抗压强度衰退性能,主要是由于外掺料 DC - 1 和 DC - 2 中富含 SiO<sub>2</sub>,提高了水泥浆体系中的 SiO<sub>2</sub>/CaO 比,改善了水泥石的抗高温性能。

低密度水泥浆较好的稳定性对固井施工安全至关重要,通过实验测定,水泥石柱上下密度差 < 0.02 g/cm<sup>3</sup>,具有良好的沉降稳定性。

#### 1.4 地面试验

由于人造微珠为新型减轻材料,为验证干混及现场施工的可行性,保证施工安全,进行地面试验。干混 6 次后,取样 4 点,对比各点样品的水泥浆测量密度和稠化时间,试验数据差异均在要求范围以内,证明混配达到均匀。

地面试验共混配 10 m<sup>3</sup> 水泥浆,水泥浆密度控制在 1.28 ~ 1.31 g/cm<sup>3</sup>,排量控制在 0.8 ~ 1.6 m<sup>3</sup>/min,水泥浆流动度好,证明施工可行,为现场应用奠定了基础。

## 2 现场应用

新型高强低密度水泥浆体系在大庆油田现场应用了12口井,主要用于深井长封、全封以及钻进过程中发生漏失的井。一次固井成功率100%,固井质量合格率100%,取得良好的应用效果。

### 2.1 深井尾管固井中的应用

肇深19井完钻井深3500 m,地处松辽盆地东南断陷区徐家围子断陷徐西凹陷。钻井过程中,在井深3281 m处发生漏失,累计漏失钻井液185.5 m<sup>3</sup>,堵漏剂65.5 m<sup>3</sup>。该井固井采用尾管固井工艺,尾管段封固高度1300 m,为确保防漏固井施工,漏失点以上封固段需采用密度1.40 g/cm<sup>3</sup>的低密度水泥浆。

该井固井施工情况如下:注入冲洗液21 m<sup>3</sup>,后跟2 m<sup>3</sup>缓凝药液作为隔离液。注入1.40 g/cm<sup>3</sup>低密度水泥浆30 m<sup>3</sup>,1.60 g/cm<sup>3</sup>低密度水泥浆11.3 m<sup>3</sup>。瞬时最大排量1.0 m<sup>3</sup>/min,最小排量0.8 m<sup>3</sup>/min,注入压力9~3 MPa,泵车2台(交替施工)。顶替过程中瞬时最大排量1.9 m<sup>3</sup>/min,最小排量1.5 m<sup>3</sup>/min,替压8~17 MPa,碰压13 MPa,套管试压21 MPa,稳压5 min未降,敞压。随后进行洗井,循环出回接筒以上的水泥浆,至洗井结束,井口共返出纯水泥浆。该井48 h测声变,质量合格。

### 2.2 深井全封固井中的应用

徐深6-302井完钻井深4037 m,完钻泵压15 MPa。洗井排量1.8 m<sup>3</sup>/min;循环泵压5 MPa。该井钻进至3923 m发生气侵,钻井液密度提高至1.30 g/cm<sup>3</sup>。钻进至3951 m发生井漏,堵漏后继续钻进至4037 m,再次发生气侵,钻井液密度提高至1.39 g/cm<sup>3</sup>,再次发生井漏。堵漏后提前完钻,累计漏失钻井液325 m<sup>3</sup>。固井前承压实验加压3.5 MPa,降到2 MPa。

该井固井施工情况如下:注入冲洗液26 m<sup>3</sup>,后跟2 m<sup>3</sup>缓凝药液作为隔离液。注入1.40 g/cm<sup>3</sup>低密度水泥浆103 m<sup>3</sup>,1.90 g/cm<sup>3</sup> G级加砂水泥浆17.3 m<sup>3</sup>。瞬时最大排量1.75 m<sup>3</sup>/min,最小排量

1.5 m<sup>3</sup>/min,注入压力7~3 MPa,泵车2台。顶替过程中瞬时最大排量1.6 m<sup>3</sup>/min,最小排量1.0 m<sup>3</sup>/min,替压2~9.5 MPa,碰压9 MPa,套管试压20 MPa,稳压10 min未降,敞压。整个施工过程中无异常情况发生,至顶替结束时,井口共返出纯水泥浆19 m<sup>3</sup>。该井72 h测声变,固井质量优质。

## 3 结论

(1)人造空心微珠密度低、承压能力高,是一种适合深井固井的优良减轻材料,应用该微珠可配制出密度1.30~1.40 g/cm<sup>3</sup>的高强低密度水泥浆;

(2)新型高强低密度水泥浆体系兼具普通漂珠低密度水泥浆和非漂珠低密度水泥浆的优点,具有浆体稳定性好、滤失量低、水泥石抗压强度高等特点,能够满足深井施工要求;

(3)地面试验及现场应用研究表明,常规的干混工艺能够使体系内各外掺料混配均匀;

(4)新型高强低密度水泥浆体系现场施工可行,不需要改造现有固井设备,水泥浆密度控制稳定,能够达到设计密度要求,适合应用于深层易漏井固井。

## 参考文献:

- [1] 李绍晨. 高温复合低密度水泥浆的研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(2): 92-94.
- [2] 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.
- [3] 沙林浩, 李立荣, 高水会, 等. 一种可替代漂珠的低密度材料[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(6): 55-60.
- [4] 贾维君. DFC非漂珠低密度水泥浆体系实验研究[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(5): 44-47.
- [5] 罗杨, 王强, 许桂莉, 等. 一种超低密度高强度水泥浆配方的优选[J]. 钻井液与完井液, 2009, 26(3): 52-55.
- [6] 张德润, 张旭. 固井液设计及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- [7] 刘崇建, 黄柏宗, 徐同台, 等. 油气井注水泥理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [8] 丁保刚, 王忠福. 固井技术基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.