

一种新型天然类火山灰低密度水泥浆的实验研究*

罗发强 郭小阳 杨远光

(“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室)

罗发强等. 一种新型天然类火山灰低密度水泥浆的实验研究. 天然气工业, 2004; 24(2): 51~54

摘 要 文章以一种广泛应用的天然类火山灰为主要减轻材料, 辅以其它硅质材料, 根据粒度级配和优化原理, 配合新开发的早强剂, 设计出密度可在 $1.35 \sim 1.60 \text{ g/cm}^3$ 范围内变化, 适合低压易漏地层固井作业的新型低密度水泥浆体系。室内实验表明: 该体系具有悬浮稳定性强、滤失量低、水泥石早期抗压强度较高、成本低廉、且浆体密度受压力影响较小等特点。克服了常规低密度水泥浆早期强度低和漂珠低密度水泥浆体系受压力影响较大的缺点, 具有良好的工程应用前景。

主题词 天然类火山灰 水泥浆 早强剂 低密度 固井

低密度水泥浆是解决低压、易漏井固井水泥浆漏失的主要途径之一。目前, 国内外常用的低密度水泥减轻材料有粉煤灰、漂珠、膨润土、水玻璃、矿渣、硬沥青等, 用这些减轻材料配制的低密度水泥浆其各有一定的应用局限。如漂珠低密度水泥浆浆体密度受剪切搅拌和压力的影响较大, 实验证明^[1], 密度为 1.35 g/cm^3 的漂珠低密度水泥浆, 在瓦棱搅拌器上以 4000 r/min 的速度搅拌配浆, 密度将上升 0.1 g/cm^3 左右。当水泥浆受压到 10 MPa 压力时密度将上升至 1.46 g/cm^3 , 当受压达 20 MPa 时其密度将上升至 1.55 g/cm^3 , 这就造成在地面所配制的漂珠低密度水泥浆密度与井下受压条件下实际密度有

较大的差异, 从而可能诱发注水泥过程中薄弱地层发生井漏, 造成固井封固段长不够并污染油气层, 因此常用于低压浅井固井作业^[2]。粉煤灰、矿渣等, 为了维持水泥浆体系的稳定性、均匀性且凝结后的水泥石要有足够高的强度, 因此用其配制低密度水泥浆时水灰比不可能太大, 其浆体密度降低有限, 一般只能降到 1.50 g/cm^3 左右, 因此其使用范围受到限制。

天然类火山灰是一种含硅量较高的硅质材料, 具有较小的密度和较大的比表面积, 吸水率高和保水性能强等特点。因此用其作为配制低密度水泥浆的外掺料, 所配制的低密度水泥浆具有较大的需求

3) 裂缝孔隙度数值评价的关键是构造应力场数值模拟, 基础是构造解析、地质建模、模拟分析、以及岩石强度理论的适当运用。

4) 裂缝孔隙度与破坏接近度系数之间存在着某种正相关关系, 但对于不同的油气藏, 它们之间具体的函数关系式不同, 在评价具体油气藏时需要进行具体的回归分析。

5) GSM 构造沙—油气藏裂缝孔隙度计算模型为: $\varphi_f = 0.00000921157e^{5.976346\eta}$ 。裂缝孔隙度与破坏接近度系数呈指数函数关系。

参 考 文 献

- 1 纳尔逊 R A. 天然裂缝性储集层地质分析. 北京: 石油工业出版社, 1991: 6~26
- 2 刘承祚, 孙惠文. 数学地质基本方法及应用. 北京: 地质出版社, 1981: 120~155
- 3 肖树芳等. 岩体力学. 北京: 地质出版社, 1987: 68~90
- 4 张宗命, 胡明, 秦启荣. 利用有限单元法预测碳酸盐岩裂缝发育区带. 天然气工业, 13(3): 21~27
- 5 秦启荣等. Quantitative prediction of fracture distribution in volcanic reservoir in 7th Area, Karamay Oil Field, 第15届世界石油大会, 1997

(收稿日期 2003-07-21 编辑 黄君权)

* 本文系 CNPC“九五”重点科技攻关课题: 井壁稳定研究, 部编号: 970406。

作者简介: 罗发强, 1977 年生, 西南石油学院化学工艺专业 2000 届硕士研究生; 主要从事固井水泥浆及外加剂研究。地址: (610500) 成都市新都区。电话: (028) 83030631。

量,从而有效地降低了水泥浆体系的密度,且其密度值不会随压力的增大而改变。本文对天然类火山灰材料进行优选,并研究能适应该体系的外加剂,从而配制出密度在 1.35~1.60 g/cm³ 范围内且性能优良的低密度水泥浆体系,该体系可满足较宽井深范围低压易漏地层固井作业的需要。

实 验 部 分

(1)实验材料。油井水泥:实验用水泥为高抗硫酸盐 G 级油井水泥(简称为 G),嘉华水泥厂生产。外加剂:①降失水剂 HS-2A、LT-2,PLT-2,成都栲胶厂生产。G60S(高),西南石油学院石油工程学院生产。②分散剂 SXY-2,成都栲胶厂生产,浅棕色粉剂。③复合早强剂 CS,实验室自制,能够显著促进水泥石早期强度的发展。外掺料:以天然类火山灰材料(简称为 NLH)为主,并辅以一定量的硅质材料(简称为 SM)。

(2)实验仪器、设备及方法。恒速搅拌器、瓦棱搅拌器、常压稠度仪、高压失水仪、常温常压流变仪、高温高压稠度仪、万能材料试验机、恒温水浴。水泥浆的配制、养护以及各项性能测试,按照 API 规范推荐方法进行。

(3)实验结论及讨论。天然类火山灰高吸水性,测定天然类火山灰需水量的具体方法是采用相对等流动法^[3,4]。以 G 级水泥(G)水灰比为 0.44 时配制水泥浆的流动度值为标准,在 G 级水泥(G)中掺入不同量的天然类火山灰材料(NLH),并改变其用水量来配制水泥浆,使其流动度值等于或接近于所定的标准值,此时所得的需水量即可被认为是天然类火山灰材料的适宜需水量。由分析结果可以看出,天然类火山灰材料的需水量为 2.54 mL/g 左右,而粉煤灰的需水量为 0.75 mL/g 左右。因此,用 NLH 配制低密度水泥浆较粉煤灰能获得更低密度的水泥浆。水泥浆的基本性能如下。

(1)浆体的稳定性能。用 NLH 材料可以配制出密度低到 1.35 g/cm³ 的水泥浆,因 NLH 的吸水性较高,配制水泥浆时水灰比较大,其浆体的稳定性欠佳,因此考虑加入一种硅质材料 SM 来改善其浆体的稳定性。由分析可以看出加入 SM 后能显著提高水泥浆的稳定性能。

(2)水泥石的抗压强度。根据粒度级配原理^[5~8],通过室内实验找出了 G、NLH 和 SM 三组间的最佳配比,从而得到天然类火山灰低密度水泥浆的基本配方和抗压强度值(见表 1)。

表 1 天然类火山灰材料水泥基浆的配方及抗压强度

序号	G (g)	NLH (g)	SM (g)	LT-2 (%)	SXY (%)	W/S	流动度 (cm)	密度 (g/cm ³)	50℃抗压强度		70℃抗压强度		90℃抗压强度	
									24 h	48 h	24 h	48 h	24 h	48 h
1	100	12	6	2	0.2	0.70	23	1.60	8.2	8.6	9.6	10.2	7.6	7.7
2	100	17	8	2	0.2	0.80	22	1.55	8.0	8.5	9.2	9.5	6.4	
3	100	23	10	2	0.2	0.94	22.5	1.50	7.1	8.0	9.0	9.5	5.3	5.4
4	100	29	14	2	0.2	1.00	23	1.45	5.0	5.5	7.5	8.7	4.0	
5	100	37	17	2	0.3	1.14	22.5	1.40	4.2	4.8	5.1	5.5	4.0	4.0
6	100	45	22	2	0.3	1.24	23	1.35	3.0	3.6	4.6	5.0	3.8	

注:抗压强度单位为 MPa。

从表 1 中可以看出,配制低密度水泥浆时水固比比较高,从而使得在高水固比条件下的水泥石抗压强度偏低,密度 1.35~1.45 g/cm³ 的水泥浆其 50℃和 70℃的早期抗压强度都不足 8 MPa,而 90℃时的抗压强度又出现倒退现象。为了克服天然类火山灰低密度水泥浆体系在高水固比条件下强度偏低的缺点,在室内进行了大量实验,通过对各种常规早强剂进行筛选和组配,复配出了一种能显著提高天然火山灰低密度水泥早期强度的早强剂 CS,表 2 是

加入复配早强剂 CS 后的抗压强度值。

从表 2 中可以看出,加入 2%~3% 的复合早强剂 CS 后,能够使 50℃和 70℃的水泥浆早期强度提高到 8 MPa 左右,但其高温强度仍有倒退现象,因此可用于井深 2500~3000 m 的固井作业中。

(3)水泥浆失水性能。天然类火山灰低密度水泥基浆的失水量超过 1300 mL,加入降失水剂后,其失水量能够得到控制,从分析结果中可以看出,在常规的几种降失水剂中,LT-2 能显著降低天然类火

表 2 天然类火山灰材料水泥浆在加入 CS 后的抗压强度

序号	G (g)	NLH (g)	SM (g)	W/S	CS (%)	密度 (g/cm ³)	50℃ 抗压强度		70℃ 抗压强度		90℃ 抗压强度	
							24 h	48 h	24 h	48 h	24 h	48 h
1	100	12	6	0.70	2	1.60	9.5	11.0	12.0	13.0	9.0	9.7
2	100	17	8	0.80	2	1.55	9.0	9.5	11.5	12.0	7.4	7.6
3	100	23	10	0.94	2	1.50	8.5	9.2	10.0	11.5	6.3	6.7
4	100	29	14	1.00	3	1.45	7.0	8.3	9.5	11.0	5.5	6.2
5	100	37	17	1.14	3	1.40	6.5	8.0	9.2	9.8	5.3	5.5
6	100	45	22	1.24	3	1.35	6.0	7.8	8.6	9.0	4.8	5.0

注：抗压强度单位为 MPa。

山灰低密度水泥浆的失水量,且能控制在 100 mL 以内。

(4)水泥浆流变性能。水泥浆流变性与注水泥顶替效率和施工安全密切相关,因此它是水泥浆设

计的重要参数之一。表 3 是密度为 1.35~1.40 g/cm³ 的水泥浆的流变性能。从表中可以看出,流体表现出较高的切力和强的非牛顿性质,这是保持水

表 3 天然类火山灰低密度水泥浆的流变性能

序号	密度 (g/cm ³)	CS	Φ ₆₀₀	Φ ₃₀₀	Φ ₂₀₀	Φ ₁₀₀	Φ ₆	Φ ₃	n	k	η _p	τ ₀
1	1.35		46	29	23	16	10	8	0.54	0.51	0.0195	4.854
2	1.35	3	47	31	28	21	13	10	0.27	2.94	0.015	8.176
3	1.40		47	30	26	20	11	8	0.37	1.52	0.015	7.665
4	1.40	3	61	42	37	30	13	10	0.31	3.1	0.018	12.26

泥浆稳定性的需要,加入早强剂 CS 使水泥浆的稠度有一定的增加。

压力对水泥浆密度的影响。天然类火山灰和硅质材料都是骨架型材料,自身较为密实,承压能力强且随压力的影响较小,因此用其配制的水泥浆密度受压力的影响较小;而漂珠是中空的玻璃球体,在压力作用下容易破裂或从壳体缺陷处进水而使其视密度上升,因此用其配制的水泥浆密度受压力的影响较大。图 1 和图 2 是天然类火山灰和漂珠低密度水泥浆受压下的密度变化情况。可以看出天然类火

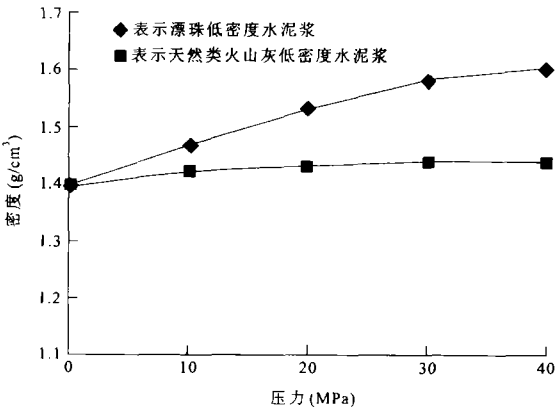


图 2 密度为 1.40 g/cm³ 的低密度水泥浆

山灰低密度水泥浆的密度受压力的影响较小。

水泥浆体系的性价比

天然类火山灰来源广、价格低,是一种易得的廉价材料,这就决定了用天然类火山灰配制的低密度水泥浆的低成本性。而漂珠,微硅因目前广泛使用,已达到供不应求的状况,其价格日益增长,微硅价格已经超过 3000 元/t,漂珠价格已达 2000 元/t,因此

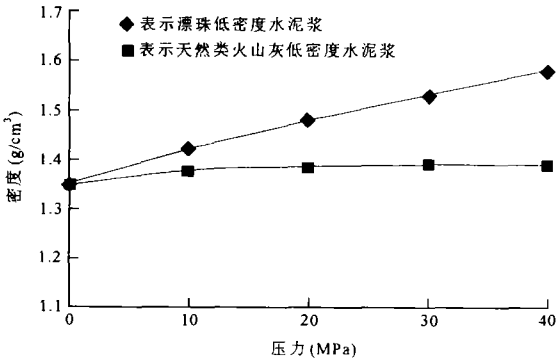


图 1 密度为 1.35 g/cm³ 的低密度水泥浆

漂珠和微硅低密度水泥浆成本逐渐升高,导致固井成本上升。天然类火山灰低密度其成本只有漂珠微硅的 $1/4 \sim 1/2$,虽然它的某些性能不及漂珠和微硅低密度水泥浆,但其性价比却高于漂珠和微硅低密度水泥浆,因此它有望替代漂珠和微硅低密度水泥浆用于低压易漏井的固井作业中。

作用机理分析

天然类火山灰材料和硅质材料含硅量都较高,其 SiO_2 含量高达 90% 以上,且其颗粒细小,比表面积大,能够吸附较多的水。它们与水泥相混后能够形成密实的水泥浆体系,从而保证了所配水泥浆体系的悬浮稳定性和自由水低的特性;因其含有较高的 SiO_2 ,而 SiO_2 能与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,生成水化硅酸钙凝胶,促进水泥水化和水泥石抗压强度的发展,改善水泥石物相组成。从而使得配制的低密度水泥浆体系具有较好的综合工程性能。

结论与建议

(1)天然类火山灰、硅质材料以及水泥之间合理搭配,可以使在高水灰比下配制出的低密度水泥浆有较好的沉降稳定性,且其 API 滤失量较小。

(2)复合早强剂能显著提高在高水固比下配制出的天然类火山灰低密度水泥石的早期抗压强度,且对水泥浆的其它性能如滤失量等无明显影响。

(3)用天然类火山灰材料配制的低密度水泥浆的密度受压力的影响小,在地面配制的密度与浆体在井下受压时的实际密度基本一致,从而克服了常

规低密度水泥浆早期强度低和漂珠低密度水泥浆体系受压力影响较大的缺点。

(4)天然类火山灰材料资源丰富,且价格低廉,可以弥补目前漂珠和微硅供不应求的矛盾。

(5)天然类火山灰低密度水泥浆体系的高温性能还有待于作进一步深入研究,以期提高其高温下的各项性能,使之适用于更深井下条件的固井作业。

参 考 文 献

- 1 刘德平等. 漂珠低密度水泥固井技术研究. 天然气工业, 1997;17(3):51~55
- 2 杨远光等. 低温早强型低密度水泥浆研究. 天然气工业, 1998;18(5):88~89
- 3 马海中等. 粉煤灰低密度水泥浆的研究与应用. 西部探矿工程, 1995;7(4):27~30
- 4 刘崇建等. 油气井注水泥理论与应用. 北京:石油工业出版社, 2001
- 5 Eric Moulin, Philippe Revil: Using concrete technology to improve the performance of light cements, SPE/IADC 39276
- 6 Anderson J W: New technology improve cement slurry design, SPE 36973
- 7 杨远光等. 油井水泥的腐蚀与防止方法研究. 西南石油学院学报, 1997;(增刊):22~24
- 8 宋碧涛等. 蛭石配制低密度水泥浆实验研究. 西南石油学院学报, 2001;23(4):40~44
- 9 杨远光等. 一种深井固井低密度水泥浆. 钻井液与完井液, 1999;16(6):27~29

(收稿日期 2003-06-16 编辑 钟水清)