

纳米液硅防窜水泥浆体系性能研究及应用

魏浩光

(中国石油化工股份有限公司 石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘要:在石油工程领域,近几年国内新兴起纳米液硅水泥浆体系。系统性地研究了该水泥浆体系以流态、塑态、固态存在时的各项关键性能。纳米液硅颗粒尺度小,比表面积大,具有增黏提切作用,水泥浆体系以流态存在时比普通水泥浆体系具有更好的基础性能,幂律指数为 0.69,稠度系数为 $0.45 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, API 失水 36 mL,无自由液,无沉降现象。纳米液硅颗粒的堵塞作用与促凝作用提升水泥浆体系向塑态转变时的防窜性能,气窜因子 SPN 值为 1.3,比普通水泥浆体系低 62.9%,静胶凝强度由 48 Pa 发展至 240 Pa 的时间为 7 min,模拟实验中无窜流现象发生。纳米液硅颗粒能增加水泥石致密性,并参与水泥水化反应修复水泥石内部微裂隙、微缺陷,固态水泥石力学性能也明显优于普通水泥石。纳米液硅加量 15%,龄期 7 d 时的水泥石弹性模量为 8.3 GPa,降低幅度为 38.9%,水泥石强度为 53 MPa,提高幅度为 35.9%,渗透率为 $0.007 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,比普通水泥石降低 90.9%。纳米颗粒具有限位支撑作用,纳米液硅水泥浆体系转变为塑态、固态后具有更低的水化收缩率,分别为 1.26%、0.34%。最后,介绍了纳米液硅水泥浆体系在顺北油田的应用情况,累计应用 153 井次,平均固井优良率为 91.7%,主要解决了产层套管固井的桑塔木高压水层与辉绿岩盐层窜流难题。

关键词:纳米液硅;防窜;水泥石性能;水化收缩;固井应用

中图分类号:TE256.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)04-0385-04

纳米液硅是由纳米 SiO_2 颗粒与水组成的一种悬浮分散液。经国内外学者研究,突破了制备工艺中的分散与团聚难题,形成了多种牌号的产品^[2-3]。哈里伯顿、贝克休斯、中海油油服、中石化油服等公司以纳米液硅材料为核心,构建了防窜水泥浆体系^[4-7],但纳米液硅水泥浆体系的性能研究主要集中在塑态性能,忽视了流态与固态的综合性能。本文研究了纳米液硅水泥浆体系以流态、塑态、固态 3 种形态下存在的关键性能,包括浆体以流态存在时的基础性能、向塑态转变时的防窜性能、以固态形式存在水泥石的力学性能以及水化收缩规律等特殊性能,并分析了纳米液硅材料在各项性能变化中发挥的作用机理。最后,介绍了纳米液硅水泥浆体系在新疆顺北油田产层套管固井总体应用情况及顺北 1-19 井的 168.3 mm 套管固井实例。

1 纳米液硅水泥浆体系性能

1.1 流态性能

纳米液硅水泥浆体系由 AMPS 类降失水剂 SCFL、纳米液硅 SCLS、聚羧酸类分散剂 SCD-150L、有机硅抑泡剂 SCDF-3 以及聚合物缓凝剂

SCR-6 组成。水泥浆密度为 1.90 g/cm^3 ,实验条件为 130°C 、80 MPa。实验方法参照行标《油井水泥试验方法》(SY/T 6544—2017)。

表 1 说明呈流态的纳米液硅水泥浆体系具有更好的幂律特征、API 失水性能、稳定性。纳米液硅加量为 10%、15% 时,水泥浆体系幂律指数 n 值由 0.92 下降到 0.76、0.69,稠度系数 K 值由 $0.13 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ 增加到 0.28、 $0.45 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ 。加入 10% 以上的纳米液硅时,水泥浆的稳定性显著改善,自由液由 0.8 mL 降低为 0,养护后的沉降密度差由 0.13 g/cm^3 改善至无沉降。无纳米液硅时水泥浆失水 69 mL,加入 10%、15% 纳米液硅时,水泥浆体系的 API 失水量分别为 45、36 mL。

纳米液硅中的固体颗粒比表面积大,达到了 $23 \text{ m}^2/\text{g}$,能大量吸附浆体中游离水,具有增黏提切性,改善浆体的流变学特征与稳定性。同时,纳米液硅中的固体颗粒粒径达到了纳米尺度,填充作用使 API 失水降低。

1.2 塑态性能

水泥浆进入油气井环空后,浆体将由流态向塑

收稿日期:2021-12-06

作者简介:魏浩光(1982—),男,四川阆中人,中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院,高级工程师,博士,研究方向为油气井固井水泥浆外加剂与体系。

态转变,环空静液柱压力逐渐减小,地层流体易在环空中发生窜流。本文从气窜因子 SPN 值、静胶凝强度实验、气窜模拟实验 3 个方面研究了纳米液硅水泥浆体系呈塑态时的性能。

表 1 纳米液硅水泥浆体系的流态性能

加量/%	<i>n</i>	<i>K</i> /Pa·s ^{<i>n</i>}	API 失水/ mL	自由液/ mL	沉降密度差/ (g/cm ³)
0	0.92	0.13	69	0.8	0.13
10	0.76	0.28	45	0	0
15	0.69	0.45	36	0	0

1.2.1 气窜因子 SPN

影响水泥浆气窜因子 SPN 的主要因素是 API 失水与稠化过渡时间。API 失水量越小,稠化过渡时间越短,SPN 越低,水泥浆体系的防窜性能越好,通常要求 SPN 值不超过 3.0^[8-9]。0% 纳米液硅加量水泥浆体系的 SPN 值 3.5,加量 10% 与 15% 纳米液硅水泥浆体系的 SPN 值分别为 1.6、1.3,分别降低了 45.7%、62.9%。纳米液硅水泥浆体系具有低失水的特征。同时,纳米二氧化硅颗粒表面富含硅羟基官能团^[10],能加速水泥水化反应,加量 10% 与 15% 使水泥浆的稠化过渡时间由 12 min 缩短至 7、5 min。因此,纳米液硅水泥浆体系的气窜因子 SPN 值显著降低。

1.2.2 静胶凝强度发展

静胶凝强度(SGS)发展就是水泥浆流态转变至塑态过程中的胶凝结构变化,静胶凝强度由 48 Pa 发展为 240 Pa 阶段为极易窜流的阶段,这段时间要求不超过 30 min,具体实验方法见 GB/T 39421—2020。本文利用 chandler 超声波静胶凝强度仪,考察了纳米液硅水泥浆体系(加量 10%)的静胶凝强度发展规律。图 1 表明纳米液硅水泥浆的静胶凝强度由 48 Pa 发展为 240 Pa 的时间仅为 10 min。分析其作用机理为:纳米二氧化硅硅羟基官能团,具有促凝性,缩短过渡时间^[11]。

1.2.3 气窜模拟实验

本文利用 chandler 气窜模拟仪^[12],开展了纳米液硅水泥浆体系塑态“失重”气窜模拟实验。将纳米液硅(加量 10%)水泥浆倒入气窜模拟装置养护釜后,随着水化进行,水泥浆逐渐进入塑态“失重”,表现为孔隙压力下降,浆柱底部的气体易向上部窜流。图 2 为纳米液硅水泥浆气窜模拟实验曲线,在水泥浆内部孔隙压力急剧下降过程中,采集到的气窜量为零,气窜模拟实验中未见气窜现象发生。

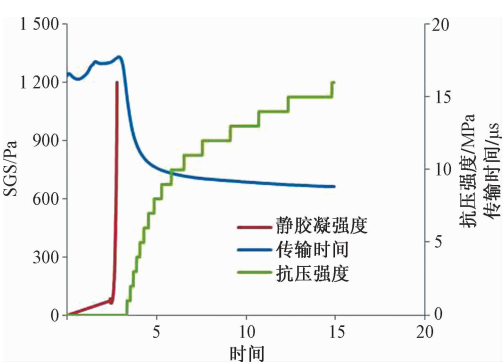


图 1 静胶凝强度发展曲线

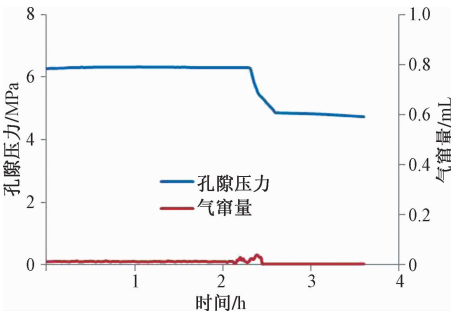


图 2 气窜模拟曲线

1.3 纳米液硅水泥浆体系固态性能

1.3.1 弹性模量

本文重点考察了纳米液硅水泥浆转变为固态水泥石后的弹性模量、强度、渗透率等工程物性参数。表 2 说明纳米液硅水泥石的弹性模量随着纳米液硅的加量增加而显著降低。加量 15% 时,降低幅度达到了 38.9%。较低弹性模量可避免各种应力作用对水泥石本体、水泥石-套管界面、水泥石-地层界面造成破坏,预防窜流的发生。油井水泥石固化后,内部存在大量的微裂隙、微缺陷,致使其力学性能较差。纳米液硅填充在水泥石的微裂隙、微缺陷里,通过参与水化反应,生产水化硅酸钙凝胶产物,对水泥石内部的微裂隙、微缺陷进行修补。

表 2 水泥石弹性模量

加量/%	0	5	10	15
弹性模量/GPa	13.6	10.8	8.7	8.3

1.3.2 抗压强度

表 3 说明龄期 1 d 时,加量 10% 与 15% 的纳米液硅水泥石抗压强度比无纳米液硅的水泥石抗压强度分别提高了 9.1%、22.7%;龄期 3 d 时,纳米液硅水泥石强度分别提高了 30%、46.7%;龄期 5 d 时,纳米液硅水泥石抗压强度分别提高了 23.5%、38.2%;龄期 7 d 时,纳米液硅水泥石抗压强度分别

提高 28.2%、35.9%。纳米二氧化硅颗粒提高水泥石抗压强度的作用机理主要有:①增加了水泥石的致密性;②具有促凝性;③参与水化反应,修补水泥石微裂隙。

表 3 不同龄期水泥石抗压强度

加量/%	抗压强度/MPa			
	1 d	3 d	5 d	7 d
0	22	30	34	39
10	24	39	42	50
15	27	44	47	53

1.3.3 渗透率

渗透率大小不仅反映了水泥石的致密性,也体现了水泥石本体的密封能力。纳米液硅的颗粒填充堵塞作用降低水泥石渗透率。无纳米液硅水泥石渗透率为 $0.22 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;加量 10%、15%的纳米液硅水泥石渗透率分别为 0.05×10^{-3} 、 $0.007 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,比普通水泥石的渗透率降低了 77.3%、90.9%。

1.4 水泥浆收缩规律

水泥浆在水化反应过程中存在着较高的体积收缩率,严重时可引起油气井水泥环界面窜流。本文利用 chandler 高温高压膨胀收缩仪,考察了纳米液硅水泥浆体系以流态、塑态、固态 3 种状态存在时的收缩规律。实验结果见表 4。

表 4 水泥浆水化体积收缩率 %

加量	流态	塑态	固态
0	0.51	1.86	1.64
10	0.50	1.64	0.56
15	0.52	1.26	0.34

表 4 说明加入纳米液硅后水泥浆体系具有更低的收缩率,0%加量纳米液硅水泥浆体系的流态、塑态、固态时的水化体积收缩率分别为 0.51%、1.86%、1.64%。纳米液硅降低水泥浆收缩率的主要作用机理为限位支撑作用^[13],可以显著降低水泥浆塑态和固态收缩率。加量 10%的纳米液硅水泥浆体系在塑态和固态水化体积收缩率分别为 1.64%、0.56%,降低幅度为 11.8%、65.8%;加量 15%的纳米液硅水泥浆体系在塑态和固态水化体积收缩率分别为 1.26%、0.34%,降低幅度为 32.3%、79.3%。

2 应用情况

2.1 顺北地区整体应用情况

新疆顺北油田位于塔里木盆地中西部,是中国

石化在碳酸盐岩海相石油勘探的新发现,平均埋藏深度超 7 300 m,具有超深、超高压、超高温的特点。其产层套管固井面临的主要难题体现在:①桑塔木组高压水层,距上层套管鞋仅 100 m 左右,安全密度窗口仅 0.03 g/cm³,极易发生水窜,应用纳米液硅防窜水泥浆体系前,水窜井比率达到了 30%;②短尾管、小井眼固井,固井质量难以保证,应用纳米液硅水泥浆体系前,该区域的固井质量优良率仅 70.3%;③水泥石强度不足,难以满足侧钻要求,需要多次打水泥塞施工。

截至目前,该区域产层套管固井累计应用纳米液硅防窜水泥浆技术 153 井次。应用后成功封住桑塔木组高压水层,应用井中未见水窜现象发生,应用井固井优良率由 70%提升至 91.7%。应用井最深顺北鹰 1 井 8 520 m。

2.2 顺北 1-19 井 168.3 mm 套管固井实例

该井的构造位置为塔里木盆地塔中北坡顺托果勒低隆,属于开发井,井型为直井。本井 3 开理论井眼直径 190.5 mm,井深 7 294 m。下入 168.3 mm 套管,套管下深 7 292 m。悬挂器位置 6 356 m。钻井液密度 1.62 g/cm³,黏度为 57 s,动切力为 24 mPa·s。主要固井难点,钻遇桑塔木组高压含水层和辉绿岩盐水层,地层多次发生漏失,安全密度窗口窄,易发生水窜。

本次固井采用纳米液硅水泥浆体系,计算井底静止温度为 140 ℃,水泥浆实验温度为 130 ℃。该井固井施工时注入 16 m³ 加重隔离液,密度 1.75 g/cm³,泵压 12↗15 MPa;注入纳米液硅防窜水泥浆 16.83 m³,密度 1.90 g/cm³,注入排量 0.6~0.8 m³/min,泵压 15↘11 MPa;注压塞液 2 m³,密度为 1.75 g/cm³,注入排量为 0.5 m³/min,泵压 5 MPa;大泵替浆 12 m³,密度为 1.62 g/cm³,注入排量 0.8~0.6 m³/min,泵压 5~7 MPa;注保护液 2.9 m³,密度 1.75 g/cm³,注入排量 0.5 m³/min,泵压 5 MPa;大泵替浆 43.67 m³,密度 1.62 g/cm³,注入排量 0.8~0.3 m³/min,碰压,泵压 16↗22 MPa;检查回流,回压凡尔工作正常,起钻 10 柱,反循环洗井 1.5 周,起钻 1 柱。关井憋压 4 MPa 候凝 48 h。

开井扫塞后,经声幅测井评价全井声幅值<10%,成功封住桑塔木地层与辉绿岩盐水层,固井质量评定为优质。

3 结论

1)纳米液硅水泥浆体系以流态存在时比普通水泥浆体系具有更好的基础性能,幂律指数为

0.69,稠度系数为 0.45 Pa·sⁿ,API 失水 36 mL,无自由液,无沉降现象。纳米液硅颗粒水泥浆体系向塑态转变时的防窜系数 SPN 值为 1.3,比普通水泥浆体系低 62.9%,静胶凝强度由 48 Pa 发展至 240 Pa 的时间为 7 min,模拟实验中无窜流现象发生。

2)纳米液硅加量 15%,龄期 7 d 时的水泥石弹性模量为 8.3 GPa,降低幅度 38.9%,水泥石强度为 53 MPa,提高幅度 35.9%。龄期 7 d 固化体的渗透率为 0.007×10⁻³ μm²,比普通水泥石降低 90.9%。纳米颗粒具有限位支撑作用,纳米液硅水泥浆体系转变为塑态、固态后具有更低的水化收缩率,加量 15%的纳米液硅水泥浆体系在塑态和固态水化体积收缩率分别为 1.26%、0.34%,降低幅度为 32.3%、79.3%。

3)纳米液硅水泥浆体系在顺北油田累计应用 153 井次,平均固井优良率 91.7%,主要解决了产层套管固井的桑塔木高压水层与辉绿岩盐水层窜流难题。

参考文献

[1] 张鑫,魏浩光,刘建,等. 180 ℃液硅防气窜剂粒径优化及性能研究[J]. 钻井液与完井液,2020,37(1):97-102.

[2] 王丹,张丽娜,侯鹏坤,等. 纳米 SiO₂在水泥基材料中的应用研究进展[J]. 硅酸盐通报,2020,39(4):1003-1015.

[3] 高英力,彭江柯,何倍,等. 纳米 SiO₂超高强高流态混凝土及改性机理[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2019,41(4):130-136.

[4] 杨红歧,魏浩光. 纳米 SiO₂防气窜乳液制备及分散稳定性研究[J]. 化学工程,2020,39(5):109-153.

[5] 高元,桑来玉,杨广国,等. 胶乳纳米液硅高温防气窜水泥浆体系[J]. 钻井液与完井液,2016,33(3):67-72.

[6] 陈超,王龙,李鹏飞,等. SN 井区抗高温液硅-胶乳防气窜水泥浆[J]. 钻井液与完井液,2016,33(5):88-91.

[7] 邱燮和,王良才,郭广平. Microblock 液硅的评价及在中国油田的应用[J]. 钻井液与完井液,2010,27(4):68-70.

[8] 杨广国,陶谦,高元,等. 高温高压气井复合水泥浆体系研究与应用[J]. 科学技术与工程,2016,16(20):151-155.

[9] 郑国生,朱礼平,李群生,等. 塑性膨胀防气窜水泥浆体系研究与应用[J]. 石油钻采工艺,2013,35(5):52-55.

[10] 潘晓燕,花蕾. 纳米杂化材料的制备及其对水泥净浆早期性能的影响[J]. 低温建筑技术,2020,42(11):18-21.

[11] 于洋,李博,林彬,等. 套管柱-钻井液-水泥浆耦合系统横向振动特性分析[J]. 科学技术与工程,2020,20(30):12397-12402.

[12] 刘洋,陈敏,史芳芳,等. 水泥浆失重压力评价技术研究与应用[J]. 钻井液与完井液,2019,36(6):749-753.

[13] 雷霆,王大珩,翟文周,等. 低温低密度水泥复合减轻材料研究[J]. 科技与业,2020,20(7):171-175.

Performance Research and Application of Liquid Nano-silica
Anti-channeling Cement Slurry System

WEI Haoguang

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

Abstract: Liquid nano-silica anti-channeling cement slurry system is widely applied by Sinopec recent years. The key properties of the slurry system in the presence of fluid, plastic and solid state are systematically studied. Experiments show that, the liquid nano-silica particle size is small and the specific surface area is large. The cement slurry system has better basic properties than the ordinary cement slurry system in the presence of flow state, such as, power-law index 0.69, consistency coefficient 0.45 Pa·sⁿ, API water loss 36 mL, no free liquid, no sedimentation. Blocking and procoagulant effect of nano liquid-silica particles can improve anti-channeling performance of cement slurry system during plastic transformation. The SPN value of gas channeling factor is 1.3, which is 62.9% lower than that of ordinary cement slurry system. The time of static gel strength developing from 48 Pa to 240 Pa is 7 min. There is no channeling phenomenon in the simulation experiment. Liquid nano-silica particles can increase the compactness of cement stone, and repair the internal micro cracks and micro defects of cement stone by participating in cement hydration reaction. The mechanical properties of solid cement stone are also significantly better than ordinary cement stone. When the dosage of liquid nano silica is 15% and the age is 7 d, the elastic modulus of cement is 8.3 GPa, the decrease is 38.9%, the strength of cement is 53 MPa, the increase is 35.9%, and the permeability is 0.007×10⁻³ μm², which is 90.9% lower than that of ordinary cement. Nanoparticles have the role of limiting support. The nano-liquid silicon cement slurry system has lower hydration shrinkage after being transformed into plastic and solid. The plastic state shrinkage and solid state shrinkage are 1.26%, 0.34% lower than that of ordinary cement slurry. Finally, the application of liquid nano-silica cement slurry system in Shunbei Oilfield is introduced. The cumulative application of more than 150 wells, the average cementing excellent rate is 91.7%, which mainly solves the channeling problem of Sangtamu high pressure water layer and diabase salt water layer in production casing cementing.

Keywords: liquid nano-silica; anti-channeling; cement stone properties; shrinkage of hydration; cementing application