

硅酸钠对固井施工安全的影响

郭胜来¹, 步玉环¹, 步万荣², 沈忠厚¹, 杜 甫³, 郭辛阳¹

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 大港油田滩海开发公司, 天津 300280;
3. 长城钻探固井公司, 辽宁盘锦 124000)

摘要:硅酸钠对油井水泥缓凝剂具有促凝和助缓凝两种相互矛盾的作用,为满足固井施工安全性的需求,研究高模数硅酸钠对不同缓凝剂的影响。在分析硅酸钠对不同缓凝剂水泥浆体系水化机制影响的基础上,研究硅酸钠模数、硅酸钠加量等因素对硅酸钠助缓凝效果的影响。结果表明:硅酸钠对加有缓凝剂柠檬酸、酒石酸、氧化锌的水泥浆起到促凝作用,对葡萄糖酸钠起到助缓凝作用;模数为 1 的硅酸钠缩短了加有葡萄糖酸钠水泥浆的稠化时间,模数为 2.2 与 3.3 的硅酸钠延长了水泥浆的稠化时间;在葡萄糖酸钠加量为 0.05% 与 0.075% 的情况下,硅酸钠对静止的水泥浆起促凝作用,加量提高对流动的水泥浆起到先缓凝后促凝的作用,缓解了现场固井后候凝时间长的问题;加有硅酸钠的复配缓凝剂与葡萄糖酸钠相比,大温差适应能力好,有利于缩短候凝时间、改善长封固段井的固井质量。

关键词:硅酸钠; 缓凝剂; 固井安全; 稠化时间; 凝结时间

中图分类号:TE 256.7

文献标志码:A

Effects of sodium silicate on safety of cementing operation

GUO Sheng-lai¹, BU Yu-huan¹, BU Wan-rong², SHEN Zhong-hou¹, DU Fu³, GUO Xin-yang¹

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Dagang Oilfield Shallow Water Development Company, Tianjin 300280, China;
3. CNPC Great Wall Drilling Cementing Company, Panjin 124000, China)

Abstract: In the oil well cement, sodium silicate is used as anti-settling agent and accelerating agent, but high modulus sodium silicate can serve as a retarding enhancing agent which could extend the thickening time of the cement slurry. On the basis of the contradiction between the accelerating and retarding enhancer ability, the effects of high modulus sodium silicate on the different kinds of cement retarder were studied to guarantee the cementing operation safety. The effects of the molar ratio of sodium silicate, and the dosage of sodium silicate on sodium silicate as retarder enhancer were also studied. The experimental results show that the high modulus sodium silicate demonstrates not only the accelerating effect on the cement slurry with the retarder citric acid, tartaric acid and zinc oxide, but also the retarding enhancing effect on the gluconate sodium. Sodium silicate with molar ratio of 1 shortens the thickening time of the slurry, and sodium silicate with molar ratio of 2.2 or 3.3 extends the thickening time. On the conditions of the dosage of sodium gluconate of 0.05% or 0.075%, sodium silicate shortens the setting time of slurry, which alleviates the problem of lengthy time for waiting on cement, and the thickening time of slurry increases first and then decreases with the increasing dosage of sodium silicate. The built retarder with sodium silicate has a better adaptability to the large temperature difference than the sodium gluconate, which helps the shortening of waiting time on cementing and improve the cementing quality of long open hole well.

Key words: sodium silicate; retarder; cementing security; thickening time; setting time

油气田开发中,固井作业^[1]是一次性的,固井 施工的安全至关重要,2010 年美国墨西哥湾的井喷

收稿日期:2013-04-11

基金项目:国家高技术研究发展计划项目(2012AA091501);教育部“长江学者和创新团队发展计划”项目(IRT1086);山东省自然科学基金项目(ZR2010EM003);中央高校基本科研业务费专项(12CX04020A)

作者简介:郭胜来(1986-),男,博士研究生,主要从事固完井技术方面的研究。E-mail:guoshenglaiupc@163.com。

事故更加引起了石油行业对固井安全的重视^[2]。为了满足复杂的井眼条件对固井水泥浆性能的要求,往往需要向固井水泥浆中加入各种外加剂或外掺料来提高水泥浆的性能或克服水泥浆的缺陷,但是由于添加剂作用机制的复杂性,一种添加剂的引入在改善水泥浆某一性能的同时可能会影响到水泥浆的其他性能。在油井水泥中,硅酸钠常常用作防沉降剂与促凝剂^[3],防沉降剂主要是用来防止水泥浆中颗粒的沉降以便配制低密度水泥浆,促凝剂主要是用来加快水泥的水化速度以便提高水泥石的早期强度。但是,Jean-Philippe等^[4]研究发现,高模数的硅酸钠可以作为一种延长水泥浆稠化时间的助缓凝剂,即在水泥浆中加有缓凝剂时,硅酸钠的加入可以延长水泥浆的稠化时间。水泥浆稠化时间的长短对于油井的固井安全起重要作用^[5-6]。笔者利用试验方法研究硅酸钠模数、硅酸钠加量、缓凝剂的类型等因素对硅酸钠助缓凝效果的影响,借助于对水泥水化机制及添加剂作用机制的研究与认识^[7-10],对硅酸钠的作用机制进行分析,并对现有缓凝剂进行复配改进,以确保固井施工的安全。

1 试验

1.1 试验原料及仪器

试剂:柠檬酸(CA)、酒石酸(TA)、氧化锌(ZO)、葡萄糖酸钠(SG)均为化学纯试剂,CF40S分散剂(中石油渤星固井公司),工业品硅酸钠(青岛泡花碱厂),嘉华G级油井水泥。

仪器:NYL-300压力试验机、OWC-2000E水浴养护箱、OWC-2000A增压稠化仪、维卡仪。

1.2 试验方法

水泥浆稠化时间测定。水泥浆的稠化时间指的是水泥浆从加温加压开始至稠度达到100 Bc的时间。水泥浆的稠化时间按GB-T19139-2003油井水泥试验方法的要求,采用高温高压稠化仪进行测试。

水泥浆终凝时间测定。水泥浆终凝时间按GB/T1346-2011水泥浆标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法的要求,采用维卡仪进行测试,本文中的凝结时间均指的是终凝时间。

水泥石抗压强度测定。每组水泥浆成型3个边长为50.8 mm的立方体试件,试件的成型、养护和强度测试均按GB-T19139-2003油井水泥试验方法的规定进行。

2 硅酸钠对含有不同缓凝剂的水泥浆体系稠化时间的影响

为研究硅酸钠对不同缓凝剂的影响,选取柠檬酸、酒石酸、葡萄糖酸钠以及氧化锌等4种常用缓凝剂,通过试验测试90℃下模数(二氧化硅与氧化钠的摩尔比)为3.3的硅酸钠对加有不同缓凝剂水泥浆稠化时间的影响,研究硅酸钠对不同缓凝剂的缓凝效果的影响。试验所采用的水泥浆配方为:嘉华G级水泥+44%水+缓凝剂+1%硅酸钠+0.5%消泡剂。加有不同缓凝剂的水泥浆的稠化时间如图1所示。

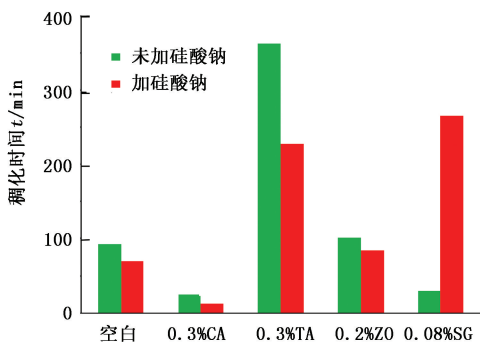


图1 硅酸钠对缓凝剂的影响

Fig. 1 Effect of sodium silicate on retarder

从图1看出:添加模数为3.3的硅酸钠前,未加缓凝剂、加有0.3%柠檬酸、0.3%酒石酸、0.2%氧化锌、0.08%葡萄糖酸钠的水泥浆的稠化时间分别为93、24、363、101和29 min,由于加有0.3%柠檬酸、0.08%葡萄糖酸钠的水泥浆稠化时间短于空白浆体的稠化时间,说明此时柠檬酸与葡萄糖酸钠起到了促凝的作用;添加模数为3.3的硅酸钠后,对应的水泥浆稠化时间分别为70、12、228、84和265 min。硅酸钠对未加缓凝剂及加有缓凝剂柠檬酸、酒石酸、氧化锌的水泥浆均起到了促凝作用,而对葡萄糖酸钠起到了助缓凝作用,延长了加有葡萄糖酸钠的水泥浆的稠化时间。向未加缓凝剂及加有缓凝剂柠檬酸、酒石酸、氧化锌的水泥浆中加入硅酸钠有使水泥浆提前稠化的危险,而向加有缓凝剂葡萄糖酸钠的水泥浆中加入硅酸钠有延长候凝时间的可能,两种情况均需在水泥浆配方设计时予以考虑。

研究^[10]认为,缓凝剂主要通过影响硅酸三钙的水化起到缓凝作用,但是水泥中的铝酸三钙及其水化产物相比硅酸三钙吸附能力较强,可以吸附较多的缓凝剂,减少缓凝剂的有效含量,从而影响缓凝剂的缓凝效果。Jian等^[11]研究了硅酸钠对高铝水泥

凝结时间的影响,随着硅酸钠加量的增加高铝水泥浆的凝结时间逐渐延长,说明硅酸钠对高铝水泥起到了缓凝作用,利用 XRD 分析在水化产物中检测到了水化硅铝酸钙,认为水化硅铝酸钙的生成延缓了高铝水泥的水化。张景福^[12]研究发现硅酸盐水泥中硅酸三钙水化产生的硅酸根离子与铝酸三钙反应生成的硅铝酸盐水化产物层在铝酸三钙颗粒表面的形成,延缓了铝酸三钙的水化。因此,在硅酸盐水泥中加入硅酸钠可能会延缓铝酸三钙的水化。在水泥浆中未加入缓凝剂的条件下,硅酸钠由于促进了硅酸三钙的水化,往往会对水泥浆产生促凝作用^[13];在水泥浆中加入缓凝剂的条件下,硅酸钠延缓了铝酸三钙的水化,减少了缓凝剂在铝酸三钙及水化产物表面的吸附,从而延长了水泥浆的稠化时间。

但是试验测试结果表明,硅酸钠对缓凝剂柠檬酸、酒石酸、氧化锌均未起到助缓凝作用,仅对葡萄糖酸钠起到了助缓凝作用。笔者分析认为,硅酸钠与水泥中的铝酸盐生成了硅铝分子筛^[14],分子稍小的柠檬酸与酒石酸以及无机缓凝剂氧化锌,被吸附进入了分子筛,降低了水泥浆溶液中缓凝剂的含量,从而缩短了水泥浆稠化时间。对于加有葡萄糖酸钠的水泥浆,硅酸钠的加入一方面抑制了铝酸盐的水化;另一方面由于葡萄糖酸盐分子稍大,硅酸钠与铝酸盐反应生成的硅铝酸盐难以将葡萄糖酸钠分子吸附进入分子筛内部,因此硅酸钠的加入延长了水泥浆的稠化时间。

3 硅酸钠对加有葡萄糖酸钠的水泥浆稠化时间和凝结时间的影响

3.1 硅酸钠模数对加有葡萄糖酸钠的水泥浆稠化时间的影响

虽然模数为 3.3 的硅酸钠对葡萄糖酸钠具有助缓凝效果,但硅酸钠具有不同的模数,是否所有模数的硅酸钠对葡萄糖酸钠都有助缓凝效果需要进一步考证。为此选取了模数为 1、2.2 和 3.3 的 3 种硅酸钠,通过试验测试 90 ℃ 下不同模数的硅酸钠对加有 0.05% 葡萄糖酸钠的水泥浆稠化时间的影响。试验采用的水泥浆配方为:嘉华 G 级水泥+44% 水+0.05% 葡萄糖酸钠+1% 硅酸钠(不同模数)+0.5% 消泡剂。结果如图 2 所示。

从图 2 看出:未加和分别加入模数为 1、2.2、3.3 的硅酸钠后水泥浆的稠化时间分别为 258、231、271、309,即模数为 1 的硅酸钠起到了促凝作用,而模数为 2.2 和 3.3 的硅酸钠均起到了助缓凝作用;

随着硅酸钠模数的增加,硅酸钠助缓凝能力增强。笔者分析认为,随着硅酸钠模数的增加,硅酸钠溶液中硅氧四面体的聚合度会逐渐增加^[15],高聚合度的硅氧四面体更容易与铝酸三钙反应生成水化硅铝酸钙,从而抑制铝酸三钙的水化。

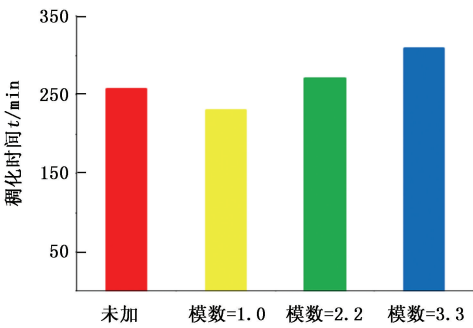


图 2 硅酸钠模数对水泥浆稠化时间的影响
Fig.2 Effect of molar ratio of sodium silicate on thickening time of slurry

3.2 硅酸钠加量对加有葡萄糖酸钠的水泥浆稠化时间的影响

由于模数为 3.3 的硅酸钠的助缓凝效果最佳,为此研究了模数为 3.3 的硅酸钠的加量变化对水泥浆稠化时间的影响,通过试验测试 90 ℃ 下不同的硅酸钠加量条件下加有葡萄糖酸钠的水泥浆稠化时间,研究硅酸钠加量对水泥浆稠化时间的影响。试验所用水泥浆配方为:嘉华 G 级水泥+44% 水+葡萄糖酸钠+硅酸钠(模数 3.3)+0.5% 消泡剂。不同硅酸钠加量下水泥浆的稠化时间如表 1 所示。

表 1 硅酸钠加量对水泥浆稠化时间的影响
Table 1 Effect of dosage of sodium silicate on thickening time of slurry min

w(硅酸钠)/%	w(葡萄糖酸钠)/%							
	0	0.05	0.075	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
0.0	93	258	11	30	35	153	671	>720
1.0	72	271	417	223	305	336	>720	>720
1.5	64	237	432	493	>720	>720	>720	>720
2.0	50	193	489	>720	>720	>720	>720	>720
3.0	40	132	279	>720	>720	>720	>720	>720

注:水泥浆稠化时间大于 720 min 表示由于水泥浆长时间不凝,无法测得准确数据。

从表 1 看出,在硅酸钠加量为 0% 时,随着葡萄糖酸钠加量的增加,水泥浆的稠化时间先增加,后减小,然后再增加,且葡萄糖酸钠加量处于 0.075% 与 0.15% 之间时,水泥浆稠化时间短于葡萄糖酸钠加量为 0% 的水泥浆,说明在加量处于 0.075% 与 0.15% 之间时,葡萄糖酸钠促进了水泥浆的水化,起到了促凝剂的作用。

葡萄糖酸钠加量为 0% 的水泥浆,随着硅酸钠加量的增加,水泥浆稠化时间逐渐缩短。葡萄糖酸钠加量为 0.05% 与 0.075% 的水泥浆,随着硅酸钠加量的增加,水泥浆的稠化时间先增加后减小。葡萄糖酸钠加量为 0.1%、0.15%、0.2%、0.25% 的水泥浆,随着硅酸钠加量的增加,水泥浆稠化时间逐渐增加。葡萄糖酸钠加量为 0.3% 的水泥浆由于缓凝作用太强,稠化时间无法测准。总的来说,硅酸钠对未加缓凝剂葡萄糖酸钠的水泥浆始终起促凝作用,对加有缓凝剂葡萄糖酸钠的水泥浆起助缓凝作用,但是随着硅酸钠加量的增加助缓凝的效果先增强后减弱,在加量更大时有可能转变为促凝作用。

3.3 硅酸钠加量对加有葡萄糖酸钠的水泥浆凝结时间的影响

由于模数为 3.3 的硅酸钠的助缓凝效果最佳,为此研究模数为 3.3 的硅酸钠的加量变化对水泥浆凝结时间的影响,选取 0%、0.05%、0.075%、0.1%、0.15% 五种葡萄糖酸钠加量,通过试验测试 75 °C 下不同的硅酸钠加量对加有葡萄糖酸钠的水泥浆凝结时间的影响,研究硅酸钠加量对水泥浆凝结时间的影响。试验用水泥浆配方为:嘉华 G 级水泥+44% 水+葡萄糖酸钠+硅酸钠(模数 3.3)+0.5% 消泡剂。硅酸钠不同加量条件下水泥浆的凝结时间如图 3 所示。

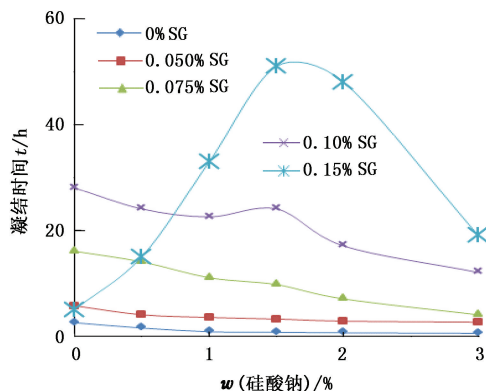


图 3 硅酸钠加量对水泥浆凝结时间的影响

Fig. 3 Effect of dosage of sodium silicate on setting time of slurry

从图 3 看出:随着硅酸钠加量从 0% 到 3%,葡萄糖酸钠加量为 0%、0.05%、0.075% 的水泥浆的凝结时间逐渐缩短,说明此时硅酸钠起到了促凝作用;葡萄糖酸钠加量为 0.1% 的水泥浆的凝结时间整体趋势为逐渐缩短,但是在硅酸钠加量为 1.5% 时,水泥浆凝结时间有明显的上升;葡萄糖酸钠加量为 0.15% 的水泥浆的凝结时间先增加后减小,说明

硅酸钠随着加量的增加,先起助缓凝作用后起促凝作用。

在葡萄糖酸钠加量为 0.05%、0.075% 与 0.1% 时,硅酸钠对硅酸三钙的促凝造成的水泥浆凝结时间的缩短效应超过了硅酸钠延缓铝酸三钙水化而减少的葡萄糖酸钠的吸附造成的水泥浆凝结时间的延长效应,从而导致水泥浆凝结时间随硅酸钠加量的增加而逐渐缩短;在葡萄糖酸钠加量为 0.15% 且硅酸钠加量稍小时,硅酸钠对硅酸三钙的促凝造成的水泥浆凝结时间的缩短效应弱于硅酸钠延缓铝酸三钙水化而减少的葡萄糖酸钠的吸附造成的水泥浆凝结时间的延长效应,从而导致水泥浆凝结时间随硅酸钠加量的增加而逐渐延长,随着硅酸钠加量的进一步增加,硅酸钠对硅酸三钙的促凝作用超过了对铝酸三钙的缓凝作用,造成水泥浆凝结时间随硅酸钠加量增加而缩短。

3.4 加有葡萄糖酸钠与硅酸钠的水泥浆凝结时间与稠化时间的对比

为了对比加入硅酸钠条件下水泥浆的凝结时间与稠化时间,选取 0.05% 和 0.075% 两种葡萄糖酸钠加量,对比研究硅酸钠加量对 75 °C 下水泥浆凝结时间与 90 °C 稠化时间的影响,结果如图 4 所示。试验用水泥浆配方为:嘉华 G 级水泥+44% 水+葡萄糖酸钠+硅酸钠(模数 3.3)+0.5% 消泡剂。

从图 4 看出,水泥浆的凝结时间随着硅酸钠加量的增加逐渐减少,而水泥浆稠化时间随着硅酸钠加量的增加呈现出先增大后减小的趋势。

随硅酸钠加量的变化水泥浆的稠化时间和凝结时间表现出不同的变化规律,笔者分析认为,这是由于稠化时间和凝结时间测试方法不同而引起的。硅酸钠加量稍小时,稠化试验测试的整个过程,水泥浆一直处于搅动状态,搅动阻碍了水泥浆中硅酸根聚合度的持续增加,延缓了由于硅酸钠的加入造成的水化硅酸钙的形成速度,也即减弱了硅酸钠对硅酸三钙的促凝作用,从而使得硅酸钠延缓铝酸三钙水化而减少的葡萄糖酸钠的吸附造成的水泥浆稠化时间的延长效应得以凸显,表现为水泥浆稠化时间的延长;当随着硅酸钠的加量达到硅酸钠对硅酸钙的促凝作用超过了对铝酸三钙的缓凝作用后,就造成了水泥浆稠化时间的缩短。

综上所述,在葡萄糖酸钠加量为 0.05% 与 0.075% 的情况下,硅酸钠对静止的水泥浆一直起到促凝的作用,并且随着硅酸钠加量的增加促凝作用越来越明显;随着加量的增加,硅酸钠对流动的水泥

浆起到先缓凝后促凝的作用。利用硅酸钠的该特性可以缓解现场固井后候凝时间长的问题,但是也正由于水泥浆静止状态下的凝结时间短于流动状态下的稠化时间,在塞流流动时,浆柱中间的大部分水泥

浆由于流速相等而保持相对静止,水泥浆有可能提前凝结,造成固井事故,因而现场注水泥时,应注意调整排量使水泥浆处于层流或紊流状态。

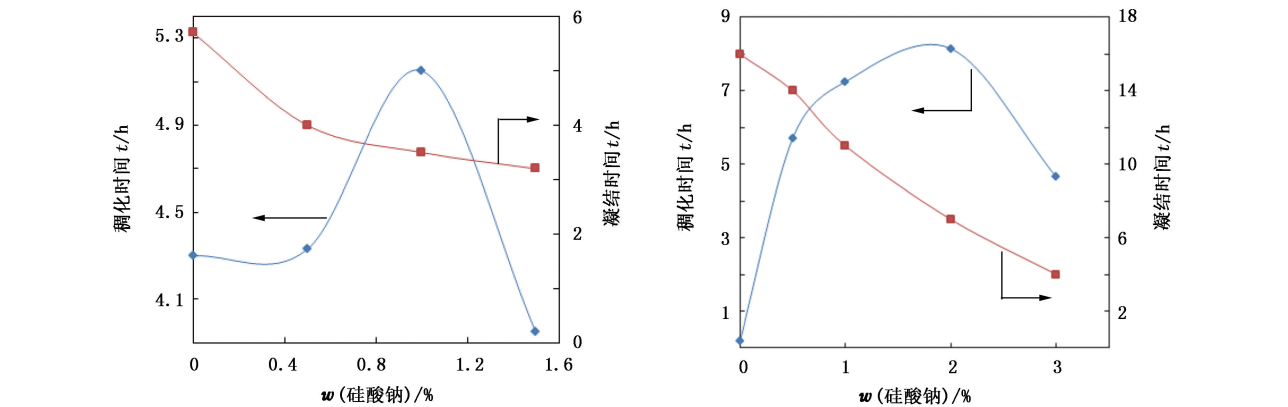


图 4 不同葡萄糖酸钠加量下水泥浆凝结时间与稠化时间对比

Fig. 4 Comparison between setting time and thickening time with different dosage of sodium

4 硅酸钠复配缓凝剂与葡萄糖酸钠的性能对比

为对比复配缓凝剂与葡萄糖酸钠的性能,以水泥浆 110 ℃ 条件下稠化时间为 240 min 为目标优选缓凝剂的加量(其中由于水泥浆中加入硅酸钠后稠度较大,因此加入 0.8% 的分散剂),并测试水泥浆 50 ℃ 的稠化时间以及水泥石 50 与 110 ℃ 的强度。测试结果如表 2 所示。

- 试验所用水泥浆配方:
- 配方 1:嘉华 G 级水泥+44% 水+0.4% 葡萄糖酸钠+0.5% 消泡剂。
- 配方 2:嘉华 G 级水泥+44% 水+3% 硅酸钠+0.2% 葡萄糖酸钠+0.8% 分散剂+0.5% 消泡剂。
- 配方 3:嘉华 G 级水泥+44% 水+0.2% 葡萄糖酸钠+0.5% 消泡剂。
- 配方 4:嘉华 G 级水泥+44% 水+0.2% 葡萄糖酸钠+0.8% 分散剂+0.5% 消泡剂。

表 2 复配缓凝剂与葡萄糖酸钠的性能对比						
Table 2 Performance comparison between built retarder and sodium gluconate						
配方号	110 ℃ 稠化时间 t/ min	50 ℃ 稠化时间 t/ min	50 ℃ 强度 p/MPa			110 ℃ 强度 p/MPa
						p/MPa
			2 d	3 d	7 d	1 d
1	247	>600	0	0	0	31
2	252	>600	8	20	31	31
3	60	>600	0	0	0	32
4	65	>600	0	0	0	31

从表 2 可以看出,加有 0.4% 葡萄糖酸钠的配

方 1 在 110 ℃ 的稠化时间为 247 min,24 h 强度 31 MPa,而在 50 ℃ 条件下 7 d 仍没有强度;加有复配缓凝剂的配方 2 在 110 ℃ 的稠化时间为 252 min,24 h 强度 31 MPa,水泥石 50 ℃ 条件下 2、3、7 d 的强度就可以达到 8、20、31 MPa;加有 0.2% 葡萄糖酸钠的配方 3 在 110 ℃ 的稠化时间为 60 min,而水泥石 50 ℃ 条件下 7 d 仍没有强度,110 ℃ 条件下 1 d 强度 32 MPa;加有 0.2% 葡萄糖酸钠与 0.8% 分散剂的配方 4 在 110 ℃ 的稠化时间为 65 min,水泥石 50 ℃ 条件下 7 d 没有强度,110 ℃ 条件下 1 d 强度 31 MPa。以上说明水泥浆中硅酸钠的加入延缓了水泥浆的稠化时间,加有硅酸钠的复配缓凝剂有良好的大温差适应能力,有利于缩短候凝时间,改善长封固段井的固井质量,且分散剂的加入对水泥浆的稠化及强度性能基本无影响。

5 结 论

- (1)硅酸钠对加有柠檬酸、酒石酸、氧化锌的水泥浆起到促凝作用,硅酸钠对葡萄糖酸钠起到助缓凝作用。向加有缓凝剂柠檬酸、酒石酸、氧化锌的水泥浆中加入硅酸钠有使水泥浆提前稠化的危险,向加有缓凝剂葡萄糖酸钠的水泥浆中加入硅酸钠有延长候凝时间的可能,均需在水泥浆配方设计时予以考虑。
- (2)对于加有缓凝剂葡萄糖酸钠的水泥浆体系,硅酸钠模数对硅酸钠的助缓凝效果影响较大,模数为 1 的硅酸钠缩短了水泥浆的稠化时间,模数为 2.2 与 3.3 的硅酸钠延长了水泥浆的稠化时间,且

随着模数的增加,硅酸钠的助缓凝能力增强。

(3)当葡萄糖酸钠加量小于0.15%时,硅酸钠的加入缩短了水泥浆的凝结时间;葡萄糖酸钠加量不小于0.15%时,随着硅酸钠加量的增加,加有葡萄糖酸钠的水泥浆的凝结时间先延长后缩短。

(4)在葡萄糖酸钠加量为0.05%与0.075%的情况下,硅酸钠对静止的水泥浆一直起到促凝的作用,并且随着硅酸钠加量的增加促凝作用越来越明显;硅酸钠对流动的水泥浆起到先缓凝后促凝的作用。硅酸钠的这种特性缓解了现场固井后候凝时间长的问題。

(5)加有硅酸钠的葡萄糖酸钠复配缓凝剂与葡萄糖酸钠相比大温差适应能力好,有利于缩短候凝时间,可以有效地改善长封固段井的固井质量。

参考文献:

- [1] 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 Qing-yu, ZOU Jian-long, TAN Wen-li, et al. The advances of cementing technology for high temperature and deep well home and abroad[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005, 22(6): 57-61.
- [2] 齐奉忠,刘硕琼,杨成颢,等. BP墨西哥湾井喷漏油事件给深井固井作业的启示[J]. 石油科技论坛, 2011(5): 45-48.
QI Feng-zhong, LIU Shuo-qiong, YANG Cheng-jie, et al. Inspiration of BP spill in Mexico Gulf to deep well cementing[J]. Oil Forum, 2011(5): 45-48.
- [3] 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.
- [4] JEAN-PHILIPPE Caritey. Versatile additives for well cementing applications: US, 20080318811 [P]. 2008-08-22.
- [5] 黄洪春,郑新权,刘爱萍. 三高气田固井水泥体系研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2011, 35(1): 77-88.
HUANG Hong-chun, ZHENG Xin-quan, LIU Ai-ping. Cement systems for well cementation in gas fields with high pressure, high gas production rate and high sulfur content[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(1): 77-88.
- [6] 王祥林,黄义春,牛丽君. 固井工程中的抗窜研究[J]. 石油学报, 1999, 20(4): 88-92.

WANG Xiang-lin, HUANG Yi-chun, NIU Li-jun. A research on preventing and resisting the oil permeation in well cementation [J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(4): 88-92.

- [7] GINTAUTAS. Effect of $\text{Na}_2 \cdot \text{nSiO}_2$ nanodispersion on the strength and durability of Portland cement matrix [J]. Materials Science, 2010, 16(1): 86-93.
- [8] JEFFREY W B. Mechanisms of cement hydration [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(12): 1208-1223.
- [9] JEFFREY J T. Influence of nucleation seeding on the hydration mechanisms of tricalcium silicate and cement [J]. The Journal of Physical Chemistry, 2009, 113(11): 4327-4334.
- [10] BENSTED J, BARNES P. Structure and performance of cements [M]. London: Spon Press, 2002: 100.
- [11] JIAN Ding, YAN Fu. Study of hydration mechanisms in the high alumina cement-sodium silicate system [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(5): 799-804.
- [12] 张景福. G级油井水泥的水化硬化及性能 [D]. 杭州:浙江大学化学系, 2001.
ZHANG Jing-fu. Hydration, hardening and properties of class G oil well cement [D]. Hangzhou: Department of Chemistry of Zhejiang University, 2001.
- [13] 张明龙. 水玻璃对水泥浆液硬化的影响 [J]. 江西煤炭科技, 1999(2): 47-50
ZHANG Ming-long. The effect of sodium silicate on the hardening of cement slurry [J]. Jiangxi Coal Science and Technology, 1999(2): 47-50.
- [14] 王华英,杨赞中,卢艳龙. 利用天然硅酸盐矿物制备无粘结剂沸石分子筛的研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(4): 846-849.
WANG Hua-ying, YANG Zan-zhong, LU Yan-long. Research progress of preparation of binderless zeolites from silicate minerals [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2011, 30(4): 846-849.
- [15] 曹德光,苏达根,宋国胜. 低模数硅酸钠溶液的结构及其键合反应特性 [J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(8): 1036-1039.
CAO De-guang, SU Da-gen, SONG Guo-sheng. Geopolymeric behavior and structure of lower modulus sodium silicate solutions [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(8): 1036-1039.

(编辑 刘为清)