

抗高温水泥浆体系研究及应用

刘玲榕

(中石化华北石油工程有限公司井下作业分公司,河南 郑州 450000)

摘要:基于塔河外围区块深井、超深井对水泥浆基本性能要求,考虑高温高压对浆体性能影响,通过分析抗高温材料的作用机理,优选出适合高温水泥浆体系的外加剂,将缓凝剂、降失水剂、液硅等抗高温材料按需求配比,研究不同密度抗高温($\geq 120\text{ }^{\circ}\text{C}$)水泥浆体系,测定其常规性能。该水泥浆体系流动性好、API 失水量 $< 50\text{ mL}/30\text{ min}$ 、防窜系数 SPN 值 < 1 、水泥石高温稳定性好、抗压强度高,均满足高温高压井下施工要求。该抗高温水泥浆体系在顺北评 1H、顺北 7、中探 1 井应用效果良好,优良率高。

关键词:高温;水泥浆;缓凝剂;降失水剂;防气窜;抗压强度

中图分类号:TE256 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)09-0029-05

Research and Application of Thermostable Cement Slurry System/LIU Ling-rong (Downhole Operation Branch of Sinopec North China Petroleum Engineering, Zhengzhou Henan 450000, China)

Abstract: Based on the basic performance requirements of cement slurry in deep and ultra-deep wells in Tahe peripheral blocks and considering the effect of high temperature and high pressure on the cement slurry performance, by analyzing the mechanism of thermostable materials, the additives suitable for thermostable cement slurry are selected. The retarder, fluid loss additive, nano liquid silica and some other thermostable materials are mixed according to the requirements to carry out the research on thermostable($\geq 120\text{ }^{\circ}\text{C}$) cement slurry system with different density and measure the regular properties. This series of cement slurry, with the characteristics of good fluidity, API filter loss less than 50mL, anti-gas-migration coefficient SPN less than 1, high temperature stability and high compressive strength of the set cement, can meet the technical requirements for high temperature and high pressure underground construction. This series of thermostable cement slurry have been used in the cementing of the well-SHBP1H, well-SHB7 and well-Zhongtan1 with high excellent rate.

Key words: high temperature; cement slurry; retarder; fluid loss additive; anti-gas-migration; compressive strength

0 引言

塔河外围区块深部地层油气资源丰富,是勘探开发的重点区块,深井、超深井的数量逐年增加,为了缩短钻井周期,常使用长裸眼钻井工艺技术,且深部地层地质情况十分复杂,面临温度高、压力大、井漏等诸多难题,因此,长封固段固井施工难度大,对水泥浆的性能要求较高,防止高温高压下,水泥浆出现失水量过大、稠化时间难控制、浆体不稳定、强度衰减等问题。

水泥浆性能要求如下。

(1)稠化时间:井深超过 7000 m,井底温度超过 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$,压力高于 90 MPa ,需要防止稠化时间过短或是发生促凝,造成固井事故,需要选用高温缓凝剂,且要求稠化过渡时间($30\sim 100\text{ Bc}$) $< 30\text{ min}$ 。

(2)水泥石强度:固井之后,水泥石的早期强度

(24 h)需要满足一定要求,防止气窜,对套管起支撑作用,保证良好的封隔效果,一般要求强度 $> 14\text{ MPa}/48\text{ h}$,地温条件下养护 7 d 强度不衰退。

(3)沉降稳定性:高温下,水泥浆的热稳定性差,自由液过多,易造成水泥石多孔,甚至气窜,强度性能差,降低固井质量^[1],要求游离液 $\leq 0.4\%$,沉降稳定性 $\leq 0.02\text{ g}/\text{cm}^3$ 。

(4)失水和流变性:如果水泥浆中大量的滤液渗入地层,不仅会损害地层,还会导致水泥浆流变性变差,产生环空气窜,影响泵送及稠化时间,因此要求失水量 $\leq 50\text{ mL}/30\text{ min}$ 。

1 抗高温水泥浆体系

1.1 水泥浆主要组分优选

水泥浆需要满足上述技术要求,则必须添加相

应作用的外加剂,本文基于中石化工程总院的药品添加剂,从机理分析优选出适用于高温($\geq 120\text{ }^{\circ}\text{C}$)高压($\geq 90\text{ MPa}$)的深井水泥浆体系。

1.1.1 缓凝剂

高温水泥浆体系中,最重要的是缓凝剂的选择,在高温下,水泥的水化反应速度加快,而低温缓凝剂在高温条件下容易失效,无法达到施工要求的可泵送时间。缓凝剂的作用机理主要是吸附、沉淀、成核、螯合理论,其发展经历了无机物到有机物、单一体系到合成聚合物^[2],不断完善改良,扩大适应范围,降低温度或加量敏感性问题的,配伍性良好,不影响水泥石强度。

选用合成类高分子高温缓凝剂 DZH,最高适用温度可达 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$,其主要成分是有有机羧酸、有机磷酸盐类等,可以吸附于水泥颗粒表面,对水泥中的阳离子也有很强的吸附性和螯合性,作用生成稳定的五元环或六元环结构,共同作用阻碍水泥浆水化反应。

1.1.2 降失水剂

高压下,水泥浆流经渗透性地层时容易发生渗滤,降失水剂作为一种控制失水的外加剂,在固井施工中起着重要作用。降失水剂的种类很多,其中人工合成类降失水剂应用最广,它改良了天然高分子降失水剂使水泥浆增稠、以及低温下失水不可控的弱点,具有良好的抗盐抗高温性能,配伍性良好。

选用抗盐高温降失水剂 SCF200,温度范围达 $100\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$,由 AMPS(2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸)/DMAA(N-N)(N,N-二甲基丙烯酰胺)/AHPS(3-烯丙氧基-2-羟基-1-丙磺酸)/AA(丙烯酸)四元共聚物^[3]合成,克服了单体聚合物降失水剂在高温下引起的水泥浆过度缓凝缺点,该降失水剂中的丙烯酸可以增强聚合物分子与水泥颗粒表面的吸附作用,增大了水泥浆的粘度,进而降低失水,而其中的 AMPS、AHPSN、DMAA(N-N)则增强了聚合物的耐温和抗盐作用,使得高温下的水泥浆失水可控,耐高温性强。

1.1.3 热稳定性

在高温深井中,水泥颗粒的布朗运动加快,随着外加剂的增加,水泥浆的流变性和水泥石的强度也会受到一定的影响,水泥浆的热稳定性差,还会诱导气窜,这主要是因为水泥浆的 C-S-H 的粘结力被外加剂中化学物质的吸附络合作用破坏^[1],聚结性变差,为了能够使水泥浆体系的综合性能满足固

井施工要求,需要加入稳定剂来完善水泥浆体系的综合性能。

中石化石油工程研究院将球形纳米二氧化硅颗粒经处理变成水性乳液,不仅可以增强其高温稳定性,还是一种新型防气窜剂,其二氧化硅颗粒呈无定形态,在水泥浆中促进凝胶反应,使其凝胶强度增强,加之纳米级氧化硅颗粒粒径极低,充填在水泥颗粒之间,降低渗透率,综合作用,起到防气窜功能。

硅粉主要矿物成分是 SiO_2 ,可以防止水泥石强度衰减,而液硅和硅粉复配,则使水泥石的高温稳定性增强。大粒径、微粒径 SiO_2 颗粒分别与水化产物 CH 和高钙水化硅酸盐发生反应,生成高温强度较高的低钙硅酸盐、雪钙硅石和硬硅钙石,达到高温水泥石强度及热稳定性要求^[4]。

1.1.4 膨胀剂

水泥凝固时,会发生“化学收缩”,加之水泥浆失水,水泥石整体体积减小,水泥环界面胶结质量变差,形成微间隙,导致油气水层间窜动^[5],影响固井质量及油气井产量。膨胀剂的加入,可以使水泥石发生微膨胀,从而降低其体积收缩程度。

DZP 膨胀剂^[6]是一种复合膨胀剂,其成分中含有硫铝酸钙、氧化钙、氧化镁等碱性氧化物,在水化过程中,相互弥补单一作用的缺点,在不同时期的共同膨胀作用下,硫铝酸钙作用形成钙矾石($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$),其晶体很小,体积则扩大为原来的 2 倍多^[7],使得水泥石的结构致密,体积轻微膨胀;氧化钙、氧化镁则作用生成氢氧化钙、氢氧化镁等,使固相体积增大,膨胀稳定,提高其抗渗透性和强度。

1.1.5 早强剂

早强剂的发展经历了氯盐类、硫酸盐类以及有机类早强剂,其中,氯盐类早强剂早强效果最好,但是电离出的氯离子会腐蚀套管,也会与固井水泥石发生反应,降低其稳定性;硫酸盐类早强剂作用受限,在硅酸盐类水泥中的作用不明显,且会与水泥石中某些成分产生盐结晶作用,水泥石膨胀严重,出现剥落现象^[8],水泥石强度降低;有机类早强剂会出现水泥缓凝的问题,有些也会使水泥石强度降低,早强作用不稳定。因此,现在常用的是复合型早强剂。

本文选用 H-T 早强剂,通过一定配比,复合了硅酸盐及其它强碱弱酸盐,无机盐在水中电离出的阳离子一方面可以改变其溶解度,加快水化反应,另

一方面可以增加离子浓度,压缩水泥颗粒的扩散双电层,降低水泥颗粒的电动电位,颗粒间斥力下降,同样是加速了水化反应;而电离生成的硅酸盐可与水泥浆中的钙离子发生反应,形成水化物的结晶中心^[9],进而促进水化反应,加快水泥早期强度的形成。

1.2 水泥浆基本配方及室内评价

1.2.1 基本配方

室内优选出不同密度的抗高温水泥浆体系,配方如下:

(1)1.88 g/cm³。库 G 水泥 + 40% 硅粉 + 8% 微硅 MSi + 7% 降失水剂 SCF200 + 8% 液硅 SCLS + 3% 缓凝剂 DZH - 3 + 49% 水。

(2)1.91 g/cm³。库 G 水泥 + 45% 硅粉 + 3%

微硅 MSi + 3% 膨胀剂 DZP - 2 + 5.5% 降失水剂 SCF200 + 0.25% 早强剂 H - T + 0.15% 缓凝剂 DZH - 2 + 0.6% 分散剂 DZS + 0.15% 消泡剂 DZX + 6% 液硅 SCLS + 54% 水。

(3)2.10 g/cm³。库 G 水泥 + 35% 硅粉 + 90% 复合加重材料 MHM + 8% 微硅 MSi + 4% 膨胀剂 DZP - 2 + 11% 降失水剂 SCF200 + 0.35% 缓凝剂 DZH - 2 + 1.5% 早强剂 H - T + 0.2% 消泡剂 DZX + 76% 水。

1.2.2 水泥浆基本性能

不同密度抗高温水泥浆的基本性能如表 1 所示,流变性能、沉降稳定性良好,失水量均小于 50 mL。

表 1 抗高温水泥浆体系基本性能

配方编号	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	测试温度 $T / ^\circ\text{C}$	沉降稳定性 / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	流性指数 n	稠度系数 $K / (\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$	$FL / [(\text{mL} \cdot (30 \text{ min})^{-1})]$
1	1.88	143	1.88/1.88/1.88	0.81	0.55	46
2	1.91	135	1.91/1.91/1.91	0.73	0.64	38
3	2.10	122	2.10/2.10/2.10	0.78	0.95	32

1.2.3 稠化时间、抗压强度等常规性能

抗高温水泥浆体系的基本性能满足了一定要求之后,还需要根据施工要求的可泵送时间,通过改变缓凝剂的量,控制稠化时间,各配方的实验条件及结

果见表 2,采集实验图像见图 1~3。利用高压高温养护釜模拟地下温度压力,根据不同时间需要,对水泥浆进行养护,测试水泥石抗压强度结果见表 2。

1.2.4 防窜性能评价

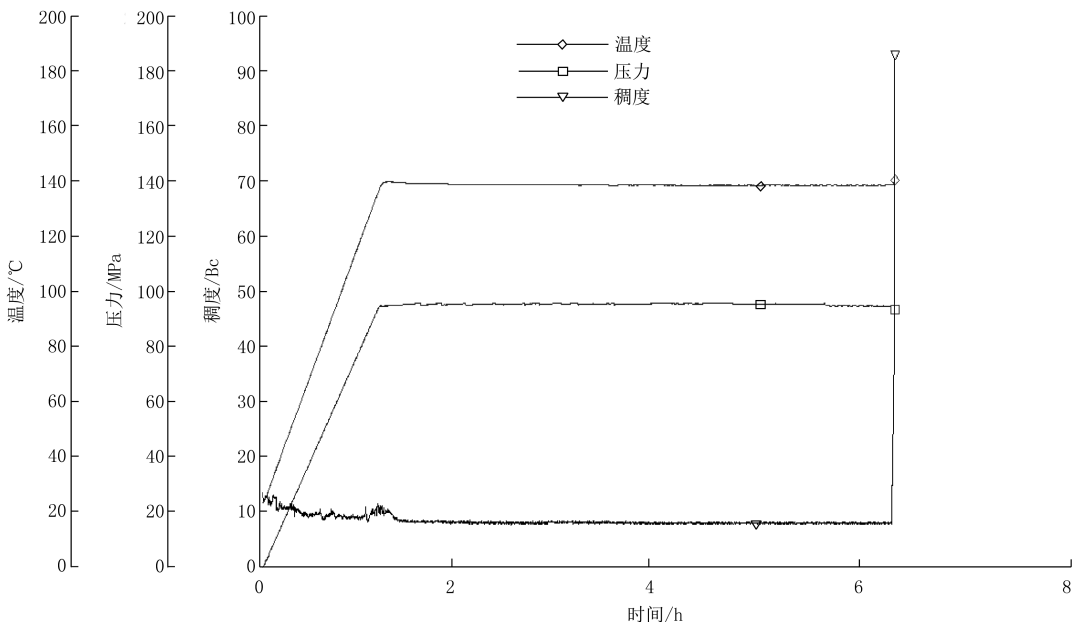


图 1 密度 1.88 g/cm³ 的水泥浆稠化曲线

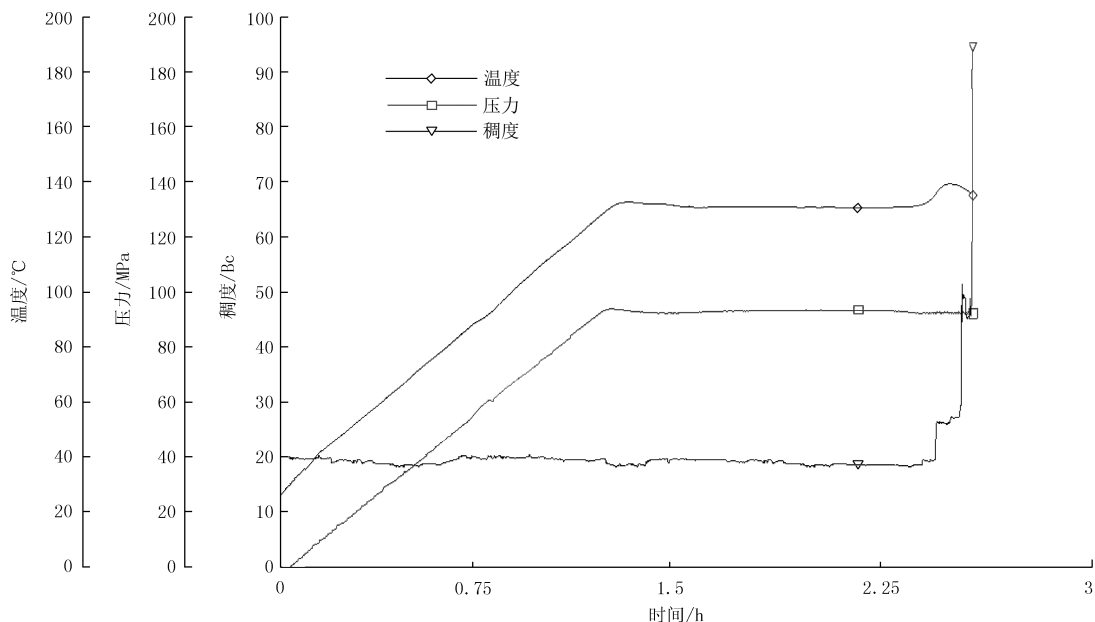
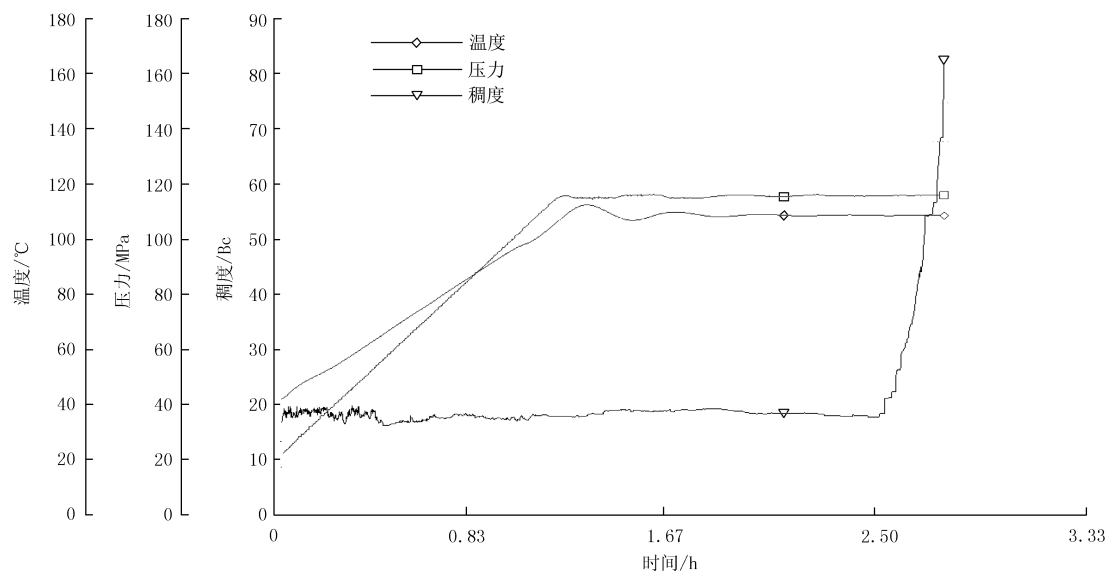
图2 密度 1.91 g/cm³ 的水泥浆稠化曲线图3 密度 2.10 g/cm³ 的水泥浆稠化曲线

表2 抗高温水泥浆体系稠化时间和强度测试

配方编号	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	测试温度 $T / ^\circ\text{C}$	抗压强度(试验压力 21 MPa) / MPa	高压 / MPa	稠化时间 / min
1	1.88	143	31.76(48 h)	98	376
2	1.91	135	25.6(72 h)/37.34(12 d)	96	154
3	2.10	122	32(48 h)	132	167

水泥浆在顶替到位后,其稠化过渡时间以及孔隙压力下降速率,决定了水泥浆防气窜能力,其性能系数值(SPN),计算公式如下所示:

$$SPN = \frac{FL \times (\sqrt{t_{100Bc}} - \sqrt{t_{30Bc}})}{\sqrt{30}} \quad (1)$$

式中: FL ——水泥浆 API 滤失量, mL/30 min;

t_{100Bc} ——水泥稠度到 100 Bc 时间, min; t_{30Bc} ——水泥稠度到 30 Bc 时间, min。

SPN 值的范围为 $0 \leq SPN \leq 3$ 时,防窜效果最好,利用公式(1)计算抗高温水泥浆体系的 SPN 值,结果见表 3,通过数据可以看出,水泥浆具有良好的防气窜能力。

表 3 抗高温水泥浆体系防窜能力

配方	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	测试温度 $T/^\circ\text{C}$	$t_{30\text{Bc}}/\text{min}$	$t_{100\text{Bc}}/\text{min}$	$FL/[\text{mL} \cdot (30 \text{ min})^{-1}]$	SPN
1	1.88	143	374	376	46	0.43
2	1.91	138	151	154	38	0.80
3	2.10	122	158	167	32	2.00

2 现场应用

抗高温水泥浆体系在深井、超深井固井作业中,可以满足施工要求,性能稳定,在西北油田塔河外围区块进行了广泛应用,效果良好。

2.1 顺北评 1H 井侧钻水泥塞

顺北评 1H 井是顺北区块的一口评价井,为下一步侧钻施工做准备,平衡法分 2 次注水泥塞,设计井深 7842 m,侧钻点 7420 m,封固段为 7520~7550 m,井底循环温度 143 $^\circ\text{C}$ 。该井使用抗高温水泥浆体系配方 1,现场入井液依次为:注 5 m^3 密度为 1.75 g/cm^3 前置液;注水泥浆 5.5 m^3 ,平均密度 1.88 g/cm^3 ;注后置液 1.5 m^3 ,密度 1.75 g/cm^3 ;替浆 61 m^3 ,密度 1.65 g/cm^3 ,到量停泵。候凝 48 h 后下钻探塞,水泥塞面 7215 m,扫塞至 7417 m,塞长 202 m,做地层承压试验验证水泥塞强度满足下一步侧钻施工要求。

2.2 顺北 7 井 $\text{O}177.8 \text{ mm}$ 尾管

顺北 7 井为顺北区块 7 号断裂带上一口预探井(直井),设计井深 7570 m,三开 $\text{O}177.8 \text{ mm}$ 油层尾管下深 7568.64 m,悬挂器位置 5308.6~5313.42 m,采用尾管悬挂固井工艺,封固井段 5308.6~7568.65 m。井底实测温度 157 $^\circ\text{C}$,循环温度 138 $^\circ\text{C}$,使用抗高温水泥浆体系配方 2。现场入井液依次为:注 3 m^3 平均密度为 1.5 g/cm^3 前置液;注 31 m^3 领浆,平均密度为 1.55 g/cm^3 ;注 15 m^3 尾浆,平均密度为 1.88 g/cm^3 ;注后置液 7 m^3 ,平均密度 1.55 g/cm^3 ;替井浆 82 m^3 ,密度为 1.45 g/cm^3 。固井施工顺利,分析声幅测井结果,上部井段固井质量合格,下部井段固井质量优良,满足施工要求。

2.3 中探 1 井尾管

中探 1 井是西北油田部署在塔里木盆地腹地的一口重点探井,设计井深为 7535 m,三开 $\text{O}177.8 \text{ mm} + \text{O}184.2 \text{ mm}$ 油层尾管下深 7081.89 m,悬挂器 5006.37~5001.37 m,采用尾管悬挂固井工艺,封固井段 5006.37~7081.89 m,井底实测温度 140 $^\circ\text{C}$,循环温度 122 $^\circ\text{C}$,使用抗高温水泥浆体系配方

3。现场入井液依次为:注 14 m^3 密度为 2.00 g/cm^3 隔离液;注水泥浆领浆 25 m^3 ,平均密度 2.11 g/cm^3 ;注水泥浆中间浆 14 m^3 ,平均密度 2.13 g/cm^3 ;注尾浆 8 m^3 ,平均密度 2.14 g/cm^3 ;注后置液 2 m^3 ,平均密度 2.00 g/cm^3 ;替井浆 82 m^3 ,密度为 1.95 g/cm^3 。固井施工顺利,分析声幅测井结果,封固井段优质井段占比 89.4%、良好井段占比 10.6%,优良率 100%。

3 结论

(1) 试验研究的抗高温水泥浆体系性能稳定,自由液为 0 mL,失水量 $< 50 \text{ mL}/30 \text{ min}$,防气窜性能好,抗压强度不衰减。

(2) 抗高温水泥浆体系在塔河外围区块深井和超深井应用效果良好。

(3) 面对深井尾管固井中水泥石弹韧性差、抗冲击力差等问题,国内抗高温水泥浆体系仍需要研究改进,建议进一步加强弹韧性材料及其对水泥石弹性模量影响的研究。

参考文献:

- [1] 崔强.新型抗盐抗高温降失水剂应用研究[D].四川成都:西南石油大学,2017:2-6.
- [2] 夏修建.新型耐高温油井水泥缓凝剂的研制[D].天津:天津大学,2013:9-17.
- [3] 刘飞,刘学鹏,夏成宇,等.抗高温水泥浆降失水剂 SCF-1 的合成及性能评价[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas/Shi You Yu Tian Ran Qi Hua Gong,2016,45(4):64-65.
- [4] 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):68-69.
- [5] 王伟.高温膨胀水泥浆体系研究[D].四川成都:西南石油大学,2013:1-2.
- [6] 桑来玉,武红卫.油井水泥膨胀剂室内检测与评价[J].石油钻探技术,2000,28(3):24-25.
- [7] 赵清军.膨胀水泥浆的研究与应用[D].黑龙江大庆:大庆石油学院,2008:7-8.
- [8] 徐卫强.油井水泥低温早强剂研究与性能评价[D].黑龙江大庆:东北石油大学,2011:5-6.
- [9] 陈金秋.抗高温高强低密度水泥浆体系研究[D].黑龙江大庆:东北石油大学,2011:28-29.