

# 山西干热岩GR1井高温固井技术研究与实践

邵一臻, 赵福金, 荆京, 祁国华, 张勃

(山西省地质工程勘察院有限公司, 山西太原 030024)

**摘要:** 固井质量对于干热岩后期开发利用具有重要意义。针对山西大同盆地干热岩勘查井GR1井温度高、高温固井水泥浆技术体系不完善等问题,通过研究勘查区地质特征,提出了高温固井水泥浆技术体系开发思路。研究表明:干热岩高温固井水泥浆水胶比控制为0.45,优选添加剂高温降失水剂CG82L、高温缓凝剂H40L、高温稳定剂CF40L、消泡剂GX-1、硅粉及HV-PAC,形成一套适用于山西干热岩井的高温固井水泥浆技术体系。该水泥浆体系在GR1井成功应用,现场固井质量良好,研究成果为今后同类型高温固井工作提供了宝贵经验和 technical 支撑。

**关键词:** 干热岩; 高温固井; 水泥浆; 高温降失水剂; 高温缓凝剂; 高温稳定剂

**中图分类号:** P634; TE256 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2022)06-0042-06

## Research and practice of cementing slurry technology for Well GR1 in Shanxi high temperature hot dry rock

XI Yizhen, ZHAO Fujin, JING Jing, QI Guohua, ZHANG Bo

(Shanxi Geological Engineering Exploration Institute Co., Ltd., Taiyuan Shanxi 030024, China)

**Abstract:** Cementing quality plays an important role in the later development and utilization of hot dry rock. In view of the problems of high temperature and the incomplete technical system of high temperature cement in hot dry rock exploration Well GR1 in Datong Basin, this paper presents the approach to the development of the high temperature cement slurry technology system through investigation of the geological characteristics of the exploration area and the cementing experience on hot dry rock wells at home and abroad. The results show that the high temperature cementing slurry system which is suitable for Shanxi high temperature dry hot rock wells can be created with the water-gel ratio of high-temperature cementing slurry for hot dry rock wells at 0.45, and the preferred additive of high temperature water loss reducer CG82L, high temperature retarder H40L, high temperature stabilizer CF40L, defoaming agent GX-1, and silicon powder and HV-PAC. The cement slurry system has been successfully applied in Shanxi high temperature hot dry rock Well GR1, and the field cementing quality was good. The research results provide valuable experience and technical support for the same type of high-temperature cementing work in the future.

**Key words:** hot dry rock; high temperature cementation; cement paste; high temperature fluid loss additive; high temperature retarder; high temperature stabilizer

### 0 引言

干热岩是可再生清洁能源的一种,具有资源量大、分布范围广泛、开发利用对环境影响小、基本不受自然条件影响等显著优势。全球陆域干热岩资源量相当于4950万亿t标准煤,是全球所有石油、天

然气和煤炭蕴藏能量的近30倍,中国大陆3~10 km深处干热岩资源量约合856万亿t标准煤,占世界资源量的1/6左右<sup>[1]</sup>。虽然干热岩热量巨大,但目前国内对于干热岩系统性研究较为薄弱,尤其受到钻探技术与成本等制约,干热岩勘探开发一直较为滞

收稿日期:2022-01-03; 修回日期:2022-05-05 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.06.006

基金项目:山西省级地质勘查基金项目“山西省阳高县一天镇县一带干热岩地热资源预可行性勘查”(编号: SXZDF20170820)

第一作者:邵一臻,男,汉族,1989年生,工程师,地质工程专业,长期从事钻探技术研究与应用工作,山西省太原市和平南路160号,839563740@qq.com。

引用格式:邵一臻,赵福金,荆京,等.山西干热岩GR1井高温固井技术研究与实践[J].钻探工程,2022,49(6):42-47.

XI Yizhen, ZHAO Fujin, JING Jing, et al. Research and practice of cementing slurry technology for Well GR1 in Shanxi high temperature hot dry rock[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6): 42-47.

后。山西省自然资源厅组织开展“山西省阳高县一天镇县一带干热岩地热资源预可行性勘查”,填补了山西省干热岩勘查及开发的空白。对勘查区干热岩地热资源量进行系统评估,2000~4000 m深处干热岩地热资源量热能为 $1.9 \times 10^{24}$  J,按2%可开采资源量计算,折合65000万亿t煤,对践行山西能源革命、优化能源结构、降低碳排放和改善生态环境具有重大意义。固井是干热岩井成井的关键环节<sup>[2]</sup>,山西大同盆地干热岩勘查井GR1井二开深度1502.82 m,井底温度157.2℃,压力15.0 MPa,常规固井水泥浆现场无法应用,亟需针对干热岩固井技术进行研究探索。为解决高温固井矛盾,本文系统梳理了高温固井水泥浆研究实践,形成了一套高温固井水泥浆技术体系,为今后同类型高温固井工作提供了经验和技 术支撑<sup>[3]</sup>。

## 1 基本情况

### 1.1 地质概况

山西省大同盆地干热岩勘查区位于山西省大同

市天阳盆地弧山庙和马圈痒一带,盆地区域性深大断裂构造延伸下切,沿深大断裂浅部发现有火成岩体侵入,深大断裂是沟通浅部热源的有利通道,将地下深处高温流体通过大型构造断裂传导上来,圈闭形成地热异常区。

勘查区地层主要有太古界集宁群(Arj)、元古界长城系(Ch)、中生界白垩系(K)、新生界新近系(N)和第四系(Q)。出露的地质体以新太古代变质基底为主,次为中、新生代陆相地层及火山岩,另有少量中元古代、早古生代海相碳酸盐岩为主的地层。干热岩地热储为太古界早中晚期变质岩、花岗结晶岩体、岩柱、岩浆侵入体,特点是埋藏浅、温度高,岩体温度150~300℃。

### 1.2 井身结构

山西省大同盆地干热岩勘查井GR1井采用三开井身结构,井深1624.01 m,二开井深1502.82 m。按照施工设计,井身结构见表1。

表1 山西大同盆地干热岩勘查井GR1井井身结构

Table 1 Structure of dry hot rock exploration Well GR1 in Datong Basin, Shanxi province

| 序号 | 开次 | 井眼直径/mm | 井深/m            | 套管规格/mm      | 下管深度/m         | 备注 |
|----|----|---------|-----------------|--------------|----------------|----|
| 1  | 护管 | 600.0   | 0~251.00        | Ø426.0×10.00 | 0~251.00       |    |
| 2  | 一开 | 406.4   | 251.00~469.47   | Ø339.7×10.92 | 0~469.47       |    |
| 3  | 二开 | 311.1   | 469.47~1502.82  | Ø244.5×10.03 | 444.60~1502.82 |    |
| 4  | 三开 | 215.9   | 1502.82~1624.01 |              |                | 裸眼 |

### 1.3 井内温压测试

使用高温测井设备连续温压测试,结果见图1,二开井底温度157.2℃,压力15.0 MPa,其中400~1500 m平均地温梯度为6.24℃/100 m,1000~1500 m平均地温梯度为8.3℃/100 m。井底温度高,对固井水泥浆稠化时间、沉降稳定性、抗压强度等抗高温性能要求高,亟待开展高温固井水泥浆技术研究<sup>[4]</sup>。

## 2 高温固井水泥浆技术体系开发

### 2.1 开发要求

山西大同盆地干热岩勘查井GR1井井底温度高,需开发满足高温条件下的固井水泥浆技术体系,对水泥浆材料选取、性能参数、配比实验进行定性和定量研究,保证水泥凝固后强度长期稳定,保障干热

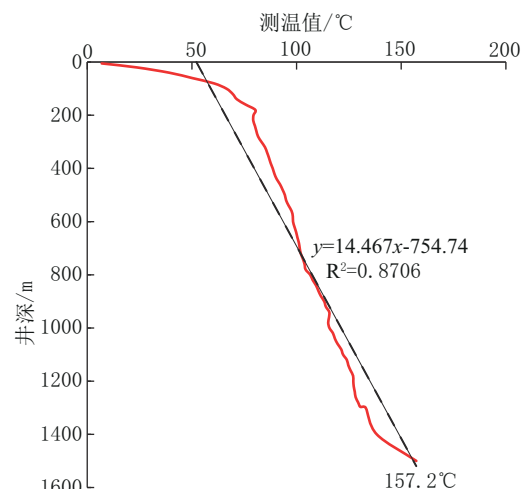


图1 GR1井测温曲线

Fig.1 Temperature logging curve of GR1

岩高温固井施工安全<sup>[5]</sup>。

## 2.2 高温水泥浆添加剂优选

### 2.2.1 高温降失水剂

高温降失水剂能够在高温环境下形成薄膜或胶粒,阻止水泥浆中的自由水析出及先期脱水,改善颗粒级配,决定水泥浆保存及圈闭自由水能力的大小,因此高温降失水剂优选为合成的有机高分子化合物CG82L。其降滤失性能在于具有多官能团线性大小分子,能吸附于水泥颗粒表面,有的基团与水结合,处理剂分子横向之间也有吸附水,从而使水泥颗粒带有结构吸附水层的外壳,保证其功能。

高温降失水剂CG82L能使水泥浆在井壁形成薄而致密的滤饼,增大了继续滤失的阻力,另一方面也能增加水泥浆中“水”流逸的阻力,降失水性能优异。通过优化其配比,高温降失水剂CG82L加量为6.7%时,失水量控制在16 mL/30 min,温度适用范

围在60~180 °C,同时CG82L水泥浆体较为稳定。

### 2.2.2 高温缓凝剂

高温缓凝剂主要是在高温环境下吸附在水泥颗粒表面或水泥水化产物晶体表面,形成一层致密的吸附膜层,改变水泥表面的双电层结构,使水泥吸附水分的过程及水化反应受到抑制,延缓水化的作用<sup>[6]</sup>。优选高温缓凝剂H40L,其在高温、高压环境下,具有足够的性能稳定性,不易断链或者降解分散,能够有效吸附于水泥颗粒及水化产物晶体表面,保证其缓凝功能<sup>[7]</sup>。

高温缓凝剂H40L温度适用范围80~200 °C,热稳定性能良好。为满足现场高温固井作业需求,通过优化高温缓凝剂H40L配比(见表2),可以有效控制水泥浆稠化时间。水泥浆稠化时间为3 h,保证固井施工作业可控连续。

表2 不同高温缓凝剂配比条件下水泥浆稠化时间

Table 2 Performance of cement slurry at different ratios of high temperature retarders

| 实验编号 | 实验参数  |        |           | 添加量/g |    |      |      | 稠化时间/h |
|------|-------|--------|-----------|-------|----|------|------|--------|
|      | 温度/°C | 压力/MPa | P.O42.5水泥 | 淡水    | 硅粉 | H40L |      |        |
| 1    | 150   | 18     | 600       | 270   | 95 | 6.0  | 1.67 |        |
| 2    | 150   | 18     | 600       | 270   | 95 | 8.0  | 2.2  |        |
| 3    | 150   | 18     | 600       | 270   | 95 | 9.0  | 2.77 |        |
| 4    | 150   | 18     | 600       | 270   | 95 | 9.5  | 3    |        |
| 5    | 150   | 18     | 600       | 270   | 95 | 10.0 | 5    |        |

### 2.2.3 高温稳定剂

水泥石强度一般情况下随压力及温度的增加而提高,当压力>20.68 MPa后,压力继续增加,对水泥石强度影响减小<sup>[8]</sup>。API规定在20.68 MPa以下试验,温度影响更为明显,温度提高后,使抗压强度达最大值,该温度称为“临界温度”。当超过此温度后,水泥石的抗压强度将急剧下降,水泥强度的衰退和渗透率的增加,对水泥浆影响极为严重<sup>[9]</sup>。

通过实验优选对比,水泥浆中加入合适比例的高温稳定剂CF40L和硅粉,能够显著提高其热稳定性,保证水泥石抗压强度,见表3。加入CF40L和硅粉的水泥,在高温下可以吸收水泥熟料水化析出的Ca(OH)<sub>2</sub>,形成纤维状的CSH(B)单体,其强度高达31.88 MPa,因此可大幅保证水泥浆的热稳定性<sup>[10]</sup>。

经实验分析,优选出适用于干热岩高温条件下

表3 不同高温稳定剂CF40L和硅粉配比条件下水泥浆性能

Table 3 Performance of cement slurry at different ratios of high temperature stabilizer CF40L and silica power

| 添加剂占比/%    |    | 150 °C的渗透率/um <sup>2</sup> |       |
|------------|----|----------------------------|-------|
| 高温稳定剂CF40L | 硅粉 | 3 d                        | 28 d  |
| 0          | 0  | 0.031                      | 4.58  |
| 0.2        | 5  | 0.001                      | 0.001 |
| 0.4        | 10 | 0.001                      | 0.001 |
| 0.6        | 15 | 0.001                      | 0.001 |
| 0.8        | 20 | 0.001                      | 0.001 |

的水泥浆添加剂:高温降失水剂CG82L、高温缓凝剂H40L、高温稳定剂CF40L、消泡剂GX-1及硅粉。

## 3 高温固井水泥浆性能评价

综合评价高温固井水泥浆性能,是保障高温固

井质量的前提。本次实验是在 150 °C、18 MPa 环境下,对水泥浆各添加剂配比加量、水泥浆稠化时间、高温沉降稳定性、水泥石抗压强度进行综合系统评价,得出最后数据结论,并在山西大同盆地干热岩勘查井GR1井成功应用<sup>[11]</sup>。

### 3.1 高温稠化性能

结合干热岩GR1井现场固井需求,对高温固井水泥浆体系的稠化性能进行研究,采用添加剂不同配比加量,考察水泥浆稠化性能,获得水泥浆稠化时间随配方调整的变化情况,见表4。

从实验结果可以看出,随着高温缓凝剂H40L加量的增加,水泥稠化时间有所增加,关系较为明显,为方便现场固井施工作业,高温缓凝剂H40L配

表4 水泥浆稠化时间变化情况

| 实验环境              | 添加剂占比/% |      |       |      | 稠化时间/h |
|-------------------|---------|------|-------|------|--------|
|                   | CG82L   | H40L | CF40L | 硅粉   |        |
| 150 °C、<br>18 MPa | 6.7     | 1.00 | 0.67  | 15.8 | 1.67   |
|                   | 6.7     | 1.33 | 0.67  | 15.8 | 2.20   |
|                   | 6.7     | 1.50 | 0.67  | 15.8 | 2.77   |
|                   | 6.7     | 1.58 | 0.67  | 15.8 | 3.00   |
|                   | 6.7     | 1.67 | 0.67  | 15.8 | 5.00   |

比选择 1.58%,水泥稠化时间为 3 h。图2可看出,水泥浆稠化曲线正常,水泥浆添加剂在高温下配伍性能良好<sup>[12]</sup>。

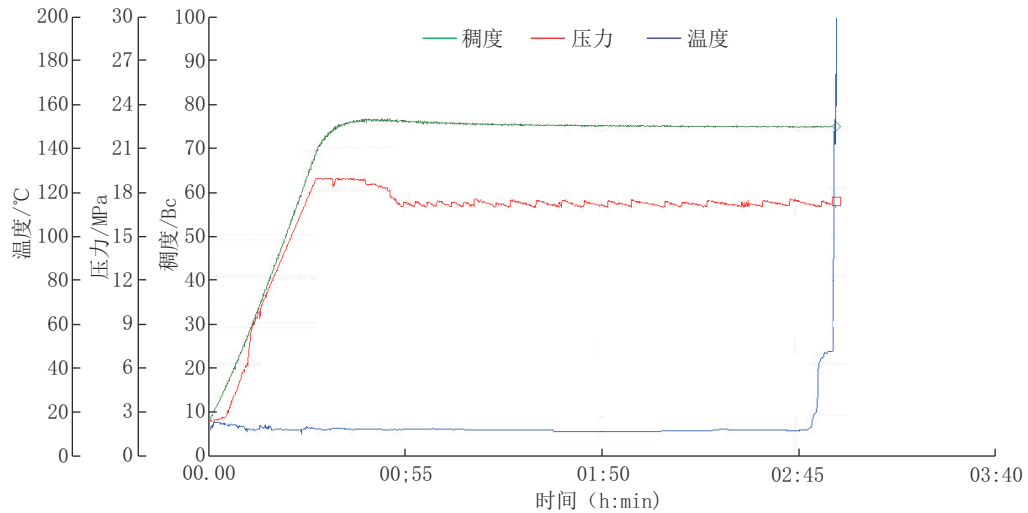


图2 150 °C条件下高温水泥浆稠化曲线

Fig.2 Thickening curve of high temperature cement slurry at 150°C

通过实验,选择水泥浆基础配方如下:

P.O42.5水泥+6.7%高温降失水剂CG82L+1.58%高温缓凝剂H40L+0.67%高温稳定剂CF40L+15.8%200目硅粉+0.5%消泡剂GX-1+0.5%HV-PAC。

### 3.2 高温沉降稳定性

高温条件下,水泥浆沉降稳定性是保证其性能的关键之一。当温度超过水泥浆临界温度,添加适当比例的水泥浆添加剂,有利于提高水泥浆悬浮能力,降低水泥浆固相颗粒沉降速率,减小水泥浆上下密度差<sup>[13]</sup>。

在 150 °C 条件下,对按上述配方配置好的水泥浆进行稠化实验,升温结束后停机,在高温养护箱内

静置 60 min,取出测量上、下部水泥浆密度,对水泥浆沉降稳定性进行评价,见表5。

表5 150 °C水泥浆沉降稳定性

| 实验组数 | 实验温度/°C | 位置 | 水泥浆密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) |
|------|---------|----|-----------------------------|
| 第一组  | 150     | 上部 | 1.79                        |
|      |         | 下部 | 1.81                        |
| 第二组  | 150     | 上部 | 1.80                        |
|      |         | 下部 | 1.80                        |

实验结果显示,水泥浆在 150 °C 条件下上下密度差 < 0.02 g/cm<sup>3</sup>,沉降稳定性较高,高温稳定剂CF40L悬浮能力和抗高温性能良好,高温降失水剂

CG82L进一步保障了水泥浆体的稳定性。

### 3.3 水泥石抗压性能评价

高温环境下,水泥石强度是保证固井质量的前提<sup>[14]</sup>。为此,在150℃条件下,使用高温养护釜对水泥浆进行24 h养护<sup>[15]</sup>,并使用微机材料测试机对养护后的水泥石进行强度测试,试验情况见图3,结果见表6。



图3 150℃下养护24 h水泥石样

Fig.3 Cement stone samples cured at 150℃ for 24h

表6 水泥石抗压强度测试结果  
Table 6 Test results of compressive strength of cement stone

| 水泥石<br>样编号 | 形变最大力/<br>kN | 受力面积/<br>mm <sup>2</sup> | 抗压强度/<br>MPa |
|------------|--------------|--------------------------|--------------|
| 1          | 47.33307     | 2580.64                  | 18.34        |
| 2          | 53.06958     | 2580.64                  | 20.56        |
| 3          | 42.11234     | 2580.64                  | 16.32        |
| 4          | 48.88595     | 2580.64                  | 18.94        |
| 平均值        |              |                          | 18.54        |

结果显示,4块水泥石样品抗压强度结果分别为18.34、20.56、16.32、18.94 MPa,平均值18.54 MPa,水泥石养护24 h后抗压强度发展结果满足高温环境下现场施工需求。

### 3.4 水泥浆综合评价

通过实验,确定150℃温度下水泥浆最终配比为:P.O42.5水泥+6.7%高温降失水剂CG82L+1.58%高温缓凝剂H40L+0.67%高温稳定剂CF40L+15.8%200目硅粉+0.5%消泡剂GX-1+0.5%HV-PAC。该水泥浆体系API滤失量为16 mL/30 min,密度为1.80 g/cm<sup>3</sup>,3 h稠度达到100 Bc,抗压强度达18.54 MPa,上下水泥浆密度差<0.02 g/cm<sup>3</sup>,满足现场固井施工需求。

## 4 现场应用

山西大同盆地干热岩勘查井GR1井设计为直井,二开 $\varnothing 311.1$  mm口径钻至井深1502.82 m,下入 $\varnothing 244.5 \times 10.03$  mm石油套管444.60~1502.82 m。对该井段进行固井作业,前置液采用清水+低密度水泥浆组合,冲刷井壁及套管外壁,提高水泥浆胶结质量。固井采用高温固井水泥浆体系,水泥浆密度为1.80 g/cm<sup>3</sup>。

固井步骤为:注入5 m<sup>3</sup>密度为1.01 g/cm<sup>3</sup>前置液,隔离循环泥浆及固井水泥浆;泵入高温固井水泥浆33 m<sup>3</sup>,直至井口返出固井水泥浆液;泵入替浆液15 m<sup>3</sup>,顶替循环管路水泥浆。现场施工顺利,施工工具使用正常,测井结果显示固井质量优,满足现场要求。

## 5 结论

(1)以高温降失水剂CG82L、高温缓凝剂H40L、高温稳定剂CF40L、消泡剂GX-1及硅粉等高温水泥添加剂为基础形成的150℃抗高温固井水泥浆技术体系,性能满足干热岩钻井二开 $\varnothing 311.1$  mm口径、1502.82 m井深、井底温度157.2℃现场施工需求,具有可推广性。

(2)高温固井水泥浆体系滤失量低,稠化时间可控,沉降稳定性强,水泥石抗压强度高,综合性能优。

(3)高温固井水泥浆技术体系在山西大同盆地高温干热岩井成功应用,为今后同类型高温固井工作提供了宝贵经验和技術支撑。

## 参考文献(References):

- [1] 许天福,张延军,曾昭发,等.增强型地热系统(干热岩)开发技术进展[J].科技导报,2012,30(32):42-45.  
XU Tianfu, ZHANG Yuanjun, ZENG Zhaofa, et al. Technology progress in an enhanced geothermal system (hot dry rock) [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32):42-45.
- [2] 王平,师鹏峰.大同地区干热岩勘查高温高压自喷井综合治理工艺[J].钻探工程,2021,48(S1):258-263.  
WANG Ping, SHI Pengfeng. Comprehensive treatment technology for high temperature and high pressure blowing wells in hot dry rock exploration in Datong [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1):258-263.
- [3] 胡晋军,和国磊,耿志山,等.天津CGSD-01地热调查井固井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(1):26-30.  
HU Jinjun, HE Guolei, GENG Zhishan, et al. Cementing tech-

- nology for Tianjin CGSD-01 geothermal survey well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(1):26-30.
- [4] 张丰琰,李立鑫.地热井固井水泥石传热性能研究现状及展望[J].钻探工程,2021,48(12):54-64.  
ZHANG Fengyan, LI Lixin. Research status and prospect of thermal transfer performance of cement in geothermal wells[J]. Drilling Engineering, 2021,48(12):54-64.
- [5] 丁树修.高温地热井水泥水化硬化的研究[J].硅酸盐学报, 1996(4):389-399.  
DING Shuxiu. Study on hydration and hardening of cement in high temperature geothermal well[J]. Journal of Silicate, 1996(4): 389-399.
- [6] 姚晓,葛莊,汪晓静,等.加砂油井水泥石高温力学性能衰退机制研究进展[J].石油钻探技术,2018,46(1):17-23.  
YAO Xiao, GE Peng, WANG Xiaojing, et al. Research progress on degradation mechanism of mechanical properties of sand-containing cement paste at high temperature[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018,46(1):17-23.
- [7] 韦梅华.从地震的活动性探讨山西干热岩分布[J].华北自然资源,2020(2):9-12.  
WEI Meihua. Discussion on the distribution of dry hot rocks in Shanxi province from the seismicity [J]. Natural Resources in North China, 2020(2):9-12.
- [8] 甘浩男,王贵玲,蒯文静,等.增强型地热系统环境地质影响现状研究与对策建议[J].地质力学学报,2020,26(2):211-220.  
GAN Haonan, WANG Guiling, LIN Wenjing, et al. Research on the status quo of environmental geology impact of enhanced geothermal system and countermeasures [J]. Journal of Geomechanics, 2020,26(2):211-220.
- [9] 牟月倩.高温高压固井技术研究[J].西部探矿工程,2006,18(4):104-105.  
MOU Yueqian. Research on high temperature and high pressure cementing technology [J]. West-China Exploration Engineering, 2006,18(4):104-105.
- [10] 张清玉,邹建龙,谭文礼,等.高温深井固井技术研究进展[J].石油天然气学报,2005,27(1):219-220,7.  
ZHANG Qingyu, ZOU Jianlong, TAN Wenli, et al. Progress of high temperature deep well completion techniques [J]. Journal of Oil and Gas, 2005,27(1):219-220,7.
- [11] 符军放.掺硅粉高水灰比水泥石高温强度衰退现象分析[J].钻井液与完井液,2017,34(1):112-115.  
FU Junfang. Analysis of high temperature strength retrogression of high water/cement ratio set cement with silica powder [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2017,34(1):112-115.
- [12] Boden D. R. Geologic Fundamentals of Geothermal Energy [M]. Boca Raton Florida, USA: CRC Press, 2016.
- [13] 路飞飞,李斐,田娜娟,等.复合加砂抗高温防衰退水泥浆体系[J].钻井液与完井液,2017,34(4):85-89.  
LU Feifei, LI Fei, TIAN Najuan, et al. High temperature anti strength retrogression cement slurry with compounded silica powder [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2017,34(4): 85-89.
- [14] Cuenot N, Faucher J P, Fritsch D, et al. The European EGS Project at Soultz-sous-Forêts: From extensive exploration to power production [C]//IEEE. 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Pittsburgh: IEEE, 2008:1-8.
- [15] Tester J W., Anderson B J., Batchelor A S., et al. The future of geothermal energy-impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21th century [R]. Boston, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2006.

(编辑 李艺)