

# 地热井暂堵型水泥基透水材料的试验研究

申 岚, 谭慧静, 宋柏睿, 冯 涛

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:** 地热开采过程中, 考虑到水源补给, 地热井一般布置在破碎带或构造带上, 在钻井过程中利用水泥进行堵漏, 但在钻井完毕后为提高产能必须进行解堵。而常规水泥在对地层封堵后需要恢复储层渗透性时, 只能通过采取酸化解堵措施, 且解堵恢复能力差。如果利用地热开发过程中的温度变化制得可降解暂堵水泥体系, 简化地热资源的勘探开发过程, 有利于降低钻井成本和风险。本文利用G级油井水泥、砂石、增强剂和水溶性纤维制备温敏型暂堵高透水水泥基材料。通过测试材料的抗压强度、孔隙度、密度、凝结时间, 以评价其降解效果及基本性能。结果显示, 水溶性纤维的加入使水泥抗压强度明显降低, 而增强剂可以稍微改善这一缺陷, 90℃水浴养护后孔隙度明显高于对照组, 并且随着时间的推移, 孔隙度不断提升, 为水泥基暂堵透水材料成功研制奠定了基础, 增强剂和纤维都会减少水泥的凝结时间, 纤维降低凝结时间的效果更为明显。该材料的研制将简化地热资源的勘探开发过程, 有利于降低钻井成本和风险。

**关键词:** 地热能; 固井; 暂堵水泥; 低温; 水溶性纤维

**中图分类号:** P634.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)S1-0243-06

## Research and development of cement-based temporary plugging permeable material

SHEN Lan, TAN Huijing, SONG Borui, FENG Tao

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenviroment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China)

**Abstract:** In the process of geothermal exploitation, considering water recharge, geothermal wells are generally arranged in broken zones or structural zones, and cement is used for plugging during the drilling process; in the end, plugging must be removed after drilling is completed so as to increase productivity. With conventional cement, plugging can only be removed by acidification in case that the permeability of the reservoir needs to be restored, and the ability to remove the plugging is poor. If temperature change in the geothermal development process can be used to prepare a degradable temporary plugging cement system, the exploration and development process of geothermal resources will be simplified, which will help reduce drilling costs and risks. In this paper, G-grade oil well cement, sand and gravel, reinforcing agents and water-soluble fibers are used to prepare temperature-sensitive, temporary plugging, and highly permeable cement-based materials. The material's compressive strength, porosity, density, and setting time were tested to evaluate its degradation effect and basic performance. The results showed that the addition of water-soluble fiber significantly reduced the compressive strength of cement, while the reinforcing agent can slightly improve this defect. The porosity after curing in a water bath at 90°C was significantly higher than the control group, and the porosity continued to increase over time, which lays the foundation for the successful development of cement-based temporary plugging and permeable materials. Reinforcing agents and fibers will reduce the setting time of cement, while the effect of fibers in reducing the setting time is more obvious. The development of this material will simplify the exploration and development process of geothermal resources and help reduce drilling costs and risks.

**Key words:** geothermal energy; cementing; temporary plugging cement; low temperature; water-soluble fiber

收稿日期: 2021-05-31 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.S1.040

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于温敏聚合物的地热井暂堵型高透水固结材料研究”(编号: 41902322)

作者简介: 申岚, 男, 汉族, 1998年生, 硕士研究生, 土木水利专业, 主要研究方向为土木工程材料, 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, shenlan1807@163.com。

引用格式: 申岚, 谭慧静, 宋柏睿, 等. 地热井暂堵型水泥基透水材料的试验研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(S1): 243-248.

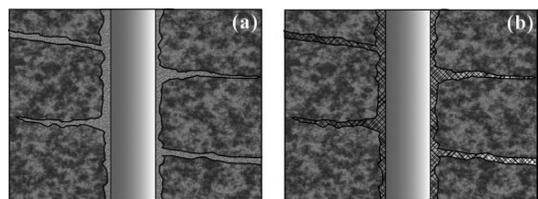
SHEN Lan, TAN Huijing, SONG Borui, et al. Research and development of cement-based temporary plugging permeable material [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1): 243-248.

## 0 引言

钻井是地热勘探及最终开发利用的唯一手段。而为获得较好的水源补给,地热井一般布置在构造带或者是地层破碎带上,使得钻进施工出现地层漏失、坍塌和井壁失稳等复杂情况<sup>[1]</sup>。钻进过程中,轻微的漏失会造成材料消耗增加,钻井成本上升,严重漏失则会造成生产中断,引起井塌、卡钻等井下事故的发生,甚至导致整个地热井的报废<sup>[2-3]</sup>。为保证钻进、降低成本和钻井风险必须采取堵漏措施。

采用钻井液或向其中添加堵漏剂进行堵漏的方式,主要适用于对松散地层及较小天然裂缝情况下的渗透性漏失和轻微漏失<sup>[4]</sup>。针对地热井钻探中,特别是地热储层容易出现大裂缝甚至是溶洞的地层,钻井液无法建立循环,应采用水泥浆堵漏<sup>[3]</sup>。固井水泥是常用的固井和堵漏材料,封堵破碎地层时相对钻井液堵漏材料经济成本更低,且效果明显,方便快捷,是钻井工程中常用的行之有效的堵漏方法<sup>[2,5-6]</sup>。

向钻孔内灌入水泥,待水泥凝固后用钻具钻穿,在孔内留下薄层的水泥圈以代替套管保护孔壁的方法,通常用于对严重破碎地层的有效封堵。在钻井完毕后,为增加地热产能,需要恢复储层的渗透率及产出通道。因此,要求封堵地层的水泥同时具备两种性质,既可以在钻井过程中强度较高、渗透率较低起到护壁堵漏作用,完钻后又可降解为地热流体的产出提供通道。常规水泥在对地层封堵后需要恢复储层渗透性时,只能通过采取酸化解堵措施<sup>[7]</sup>。因此,本文利用地热开发过程中的温度变化制得可降解暂堵水泥体系,在有效封堵保证钻进后,无需酸化解堵操作,水泥在钻井结束后地层温度升高时自降解,如图1所示。中国地质大学的李飞跃利用碱激发矿渣/粉煤灰水泥抗高温耐腐蚀的特性以及聚合物在高温下降解特性,对可自降解水泥进行了一系列类似研究<sup>[8]</sup>。该材料将简化地热资源的勘探开发过程,有利于降低钻井成本和风险,从而为我国地热资源的发展起到一定的推动作用。



(a)井筒温度升高 (b)水泥降解形成产出通道

图1 钻井结束后水泥降解过程

本文旨在研制出在钻进过程中保持高强度、致密、低渗透性保证对地层的有效封堵,而在钻井结束后井筒温度升高,聚合物纤维降解,在材料内部形成相互连通的孔洞,为地热流体(包括水或蒸汽)的产出提供通道。材料对裂缝进行封堵及降解过程,如图2所示。通过利用G级油井水泥、砂石、增强剂和可溶性纤维制备温敏型暂堵高透水水泥基材料。通过测试材料的抗压强度、孔隙度、密度、凝结时间,以评价其降解效果及基本堵漏性能。

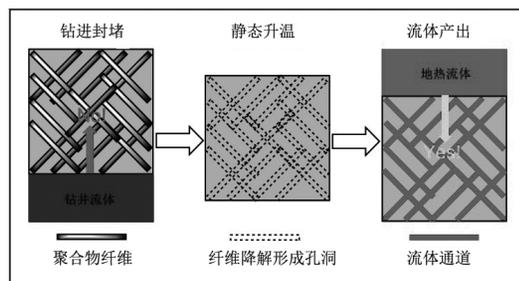


图2 材料对裂缝进行封堵及降解过程示意

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料及设备

本实验水泥基材料采用G级油井水泥、砂石、增强剂、可溶性纤维等原料进行配比:

(1)水泥采用四川嘉华水泥厂提供的高抗硫酸盐G级油井水泥,其主要成分为CaO、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,这4种氧化物含量一般在95%以上,另外含有少量的SO<sub>3</sub>、MgO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O等,各成分具体含量如表1所示。

表1 G级油井水泥的主要成分含量

原材料	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	MgO	ZnO	其他
G级油井水泥/%	3.158	64.775	19.525	3.21	5.11	0.375	0.696	0.331	0.043	2.239	0.195	0.343

- (2)所用砂石为细砾,其各项性质如表2所示。  
 (3)增强剂可消除水泥中的松散物,增加表层的

表2 砂石性质

表观密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	含泥 量/%	泥块含 量/%	含水率/ %	坚固性指标/ %
1660	1	0	2	1

密实度,提高水泥的强度和耐磨性。抗压强度和耐磨性可提高40%以上,并且可密封混凝土和堵塞、减少毛细孔,减少混凝土中水分的蒸发,从而加强水泥的养护。而水溶性纤维可以均匀分布在混凝土各个方向,提高水泥的韧性和抗张力性,从而减少塑性裂缝的生成。

- (4)所用实验仪器如表3所示。

表3 实验仪器

仪器	型号	厂家
电子天平	MP1100B	上海舜宇恒平科学仪器有限公司
全自动水泥抗折抗压试验机	YAW-300D	济南万测电气设备有限公司
数显恒温水浴锅	HH-6	上海力辰邦西仪器科技有限公司
数显鼓风干燥箱	DHG-9040	常州高德仪器制造有限公司
全自动行星式水泥胶砂搅拌机	FY-681	北京中科建仪电子科技有限公司
数显式滚子加热炉	XGRL-4	青岛百瑞达石油机械制造有限公司
计时器	OHR-B200	福建顺昌虹润精密仪器有限公司
数显液体密度计	YMS 0.01-7.0	青岛同春石油仪器有限公司

## 1.2 试验方法

试验主要测试不同纤维增强高性能水泥基材料的抗压、孔隙度等各项性质,各试件制作及试验方法均参考《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70-2009)<sup>[9]</sup>及《水泥胶砂强度检验方法 ISO法》(GB/T 17671-1999)<sup>[10]</sup>的要求进行,试件尺寸为50 mm×50 mm的正方体,试件成型24 h后拆模,再常温养护48 h。具体配料比如表4所示。

表4 配料比例

配料比	水泥/g	砂石/g	增强剂/g	水溶性纤维/g	水/mL
1	300	100	40.0	20	160
2	400	267	53.4		100
3	400	267		20	160

### 1.2.1 抗压强度

抗压强度是表征水泥块力学性能最常用和关键的指标,本次试验拟探究砂石、增强剂及纤维的含量对水泥块的抗压强度的影响。通过液压压力试验机测得不同配料比水泥块的抗压强度,测得其峰值以及不同水泥块载荷的变化。从中计算各项系数的平均值,分析影响抗压强度的原因,并制作表格曲线图观察其规律。抗压强度测试参考规范GB/T 19139—2012《油井水泥试验方法》<sup>[11]</sup>。

### 1.2.2 孔隙度

孔隙度是指岩样中所有孔隙空间体积之和与该岩样体积的比值,称为该岩石的总孔隙度,以百分数表示。本研究测试在水浴箱90℃养护1 d及2 d后的试块孔隙度。

步骤一:取干燥试块称量,得到其干重 $m_1$ 。

步骤二:将水浴锅中养护的试块取出,得到其湿重 $m_2$ 。

步骤三:用烧杯装满水,将在水浴锅养护过的试块放入烧杯中。使其在水中悬浮,测量其悬浮时的重量 $m_3$ 。

孔隙度:根据测定所得的数据,孔隙度 $\rho(\%)$ 按下式计算:

$$(m_2 - m_1)/m_3 = \rho \quad (1)$$

式中: $m_1$ ——试块干重,g; $m_2$ ——试块湿重,g; $m_3$ ——悬浮重,g; $\rho$ ——孔隙度,按%计算。

### 1.2.3 密度及凝结时间

用泥浆密度仪测量刚搅拌好的水泥密度,记录数据。用稠度凝结测定仪测定凝结时间,首先制作3种配方的试样。

根据美国Brookhaven国家实验室地热水泥的研究结果,稠化时间要在90 min以上,时间太短对注浆不利,时间太长不能较快形成强度,对井壁稳

定、漏失封堵等不利,而且延误工期,增加成本<sup>[12-13]</sup>。

将试样放入滚子炉中加热,首次测试2 h就完全凝结。重新制作测试,每加热30 min就取出测试,发现接近初凝状态。把试样放到试针下,降低试针与水泥净浆表面接触。拧紧螺丝1~2 s后,突然放松,试针垂直自由地沉入试样。观察试针停止下沉或释放试针30 s时指针的读数。邻近初凝时间时每隔5 min(或更短时间)测定一次,当试针沉至距底板 $4\pm 1$  mm时,为水泥达到初凝状态,并记录时间。

初凝时间测定后,立即将试模连同浆体以平移的方式从玻璃板取下,翻转180°,直径大端向上,小口向下放在玻璃板上,再放入滚子炉中继续加热。邻近终凝时间时每隔15 min测定一次,当试针自由落入试体0.5 mm时,为水泥达到终凝状态。

#### 1.2.4 扫描电子显微镜

扫描电子显微镜(SEM)是观察材料微观形貌常用的手段,利用聚焦的很窄的高能电子束来扫描样品,通过光束与物质间的相互作用,来激发各种物理信息,对这些信息收集、放大、再成像以达到对物质微观形貌表征的目的<sup>[14]</sup>,本次实验最主要目的要利用其证实水溶性纤维的有效溶解。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水浴养护前后外加剂对固井水泥抗压强度影响

不同条件下测试抗压强度如表5所示。

表5 抗压强度数据 MPa

养护方法	3 d 常温养护	1 d 90°C 水浴锅养护
1	5.57	4.26
2	31.10	34.12
3	3.76	3.47
油井水泥	20.29	22.06

如时间-荷载曲线图(图3、图4)可知,常温养护情况下加了纤维的试块相较于加了增强剂的更具有韧性,其破碎过程比较缓慢。而随着增强剂的加入,试块的强度显著增大,其破碎过程比较迅速,表现出断裂脆性。而增强剂和纤维都添加了的试块,强度居中并且还较高韧性。与标准水泥试块相比较,增强剂可以提升抗压强度而纤维相反。

如图可知,第2组添加增强剂强度远远高于添

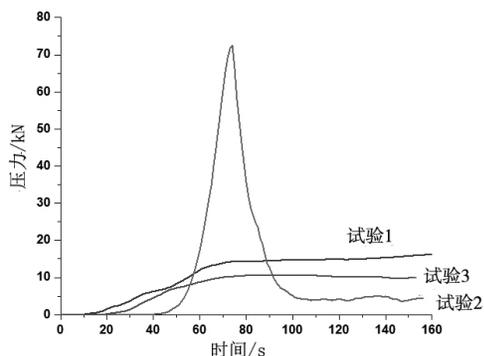


图3 3 d 常温养护试块时间-荷载曲线

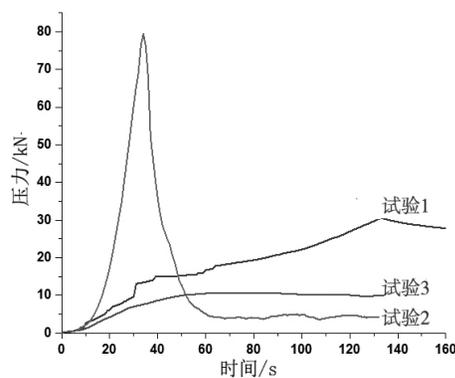


图4 常温养护后1 d 90°C 水浴养护试块时间-荷载曲线

加水溶性纤维组,而添加水溶性纤维1和3组强度相差不是很明显,强度较高的为加入增强剂组。而在90°C 1 d 水浴养护情况下,添加了纤维的试块强度都有明显下降,可以验证水溶性纤维有效溶解,形成孔道。而第2组未加入纤维在水浴中继续发生水化反应强度进而增大,达到34 MPa。

第2组添加增强剂强度远远高于添加水溶性纤维组,而添加水溶性纤维1和3组强度相差不是很明显,强度较高的为加入增强剂组。而在90°C 1 d 水浴养护情况下,添加了纤维的试块强度都有明显下降,可以验证水溶性纤维有效溶解,形成孔道。而第2组未加入纤维在水浴中继续发生水化反应强度进而增大,达到34 MPa。常温养护情况下加了纤维的试块更具有韧性,压裂过程表现出延性破坏。而只加入增强剂,试块的强度增大,其破碎过程比较迅速,表现出断裂脆性。

### 2.2 水浴养护周期对孔隙度影响

水浴养护1 d 试块实验数据如表6所示。

水浴养护2 d 试块实验数据如表7所示。

由数据可知,只加增强剂的试块孔隙度最低,并

表6 测量数据值

实验组	$m_1/g$	$m_2/g$	$m_3/g$	$\rho/\%$
1	157.17	184.34	129.43	20.9
2	269.04	284.15	206.54	7.3
3	205.49	240.74	166.03	21.2

表7 测量数据值

实验组	$m_1/g$	$m_2/g$	$m_3/g$	$\rho/\%$
1	157.17	198.04	117.23	34.8
2	269.04	277.84	191.85	6.5
3	205.49	252.34	156.95	29.8

且在水中高温养护对其孔隙度影响也并不大。而加入纤维的试块,孔隙度都较高,并且在高温水中养护对其孔隙度的影响较高,养护时间越久,其孔隙度越高。说明在90℃水浴条件下,水溶性纤维有效降解,形成孔隙通道提高渗透性。因此,可以实现根据开发过程中的井内温度变化规律,利用聚合物纤维的特性,通过对G级油井水泥改性研制适用于中低温地热井的暂堵型高透水多孔固结材料,在钻进时有效堵漏,在钻井结束、温度升高后降解为地热流体的产出通道并继续保护孔壁、防止坍塌。

只加增强剂组的试块孔隙度最低,并且在水中高温养护对其孔隙度影响也并不大。而加入纤维的试块,孔隙度都较高,并且在高温水中养护对其孔隙度的影响较高,养护时间越久,其孔隙度越高。说明在90℃水浴条件下,水溶性纤维有效降解,形成孔隙通道提高渗透性。这一现象说明研制适用于中低温地热井的暂堵型高透水多孔固结材料现实可行性,简化地热资源的勘探开发过程,利于降低钻井成本和风险。

### 2.3 外加剂对凝结时间影响

测得的数据如表8所示。

根据测得的密度数据可以得出,加入增强剂和纤维都会提高浆液的密度。单加纤维或者增强剂的试块提高的密度要比二者都添加的试块密度要大。

表8 凝结时间

水泥配方	密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	初凝时间/min	终凝时间/min
1	1.92	55	110
2	2.03	70	120
3	2.05	50	90
油井水泥浆	1.84	90	150

由凝结时间柱状图5可知,试块的初凝及终凝时间与标准G级水泥块的时间相比都有所缩短。其中配比3的最为明显。分析增强剂和纤维都会减少水泥的凝结时间,而两者相比,纤维降低凝结时间的效果更为明显。相比油井水泥浆另外3组配方初凝和终凝时间都有明显下降。初凝时间都低于规定的最长时间,符合标准。初凝、终凝时间间隔在1h以内,保持在较短时间,较大改善了水泥凝结时间,满足地热开采油井水泥要求<sup>[15]</sup>。

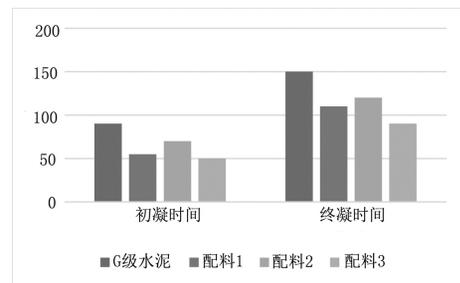


图5 凝结时间柱状图

加入增强剂和纤维都会提高浆液的密度。两者混合缩短的最为明显,所有试块的初凝及终凝时间与标准G级水泥块的时间相比都有所缩短。增强剂和纤维都会减少水泥的凝结时间,而两者相比,纤维降低凝结时间的效果更为明显。相比油井水泥浆另外3组配方初凝和终凝时间都有明显下降。初凝时间都低于规定的最长时间,符合标准。初凝终凝时间间隔在1h以内,保持在较短时间,较大改善了水泥凝结时间,满足地热开采油井水泥要求。

### 2.4 微观形貌

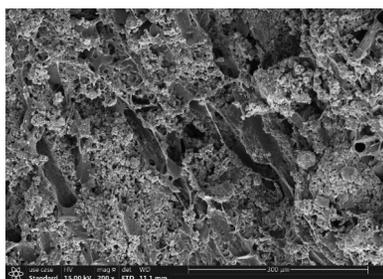
扫描电镜的结果显示(如图6所示):常温养护的水泥中纤维完整地存在于水泥中,纤维随机分布在水泥中,纤维与水泥接触,且被剥离的纤维表面附着了水泥,水泥基体仍保持较为致密,说明纤维对水泥水化产物影响较小。然而,在90℃热水浸泡后,原本纤维占据的位置变为空洞,沟通水泥中的原有孔隙,包括混入的空气以及水化产物间的孔隙。所有孔隙互相交错连通,共同构成高渗透率材料的复杂孔隙结构,促进孔隙度的增长。

## 3 结论

本文通过利用G级油井水泥、细砾、增强剂和高温水溶性纤维制备温敏型暂堵高透水水泥基材



(a)溶解前



(b)溶解后

图6 聚合物纤维溶解前后水泥基材料的微观形貌

料。通过测试材料的抗压强度、孔隙度、密度、凝结时间,以评价其降解效果及基本堵漏性能。得出的主要结论如下:

添加水溶性纤维组强度下降快,而增强剂稍微改善强度。在90℃水浴养护1d情况下,添加了纤维的试块强度进一步下降,并且从微观形貌可以看出纤维的有效溶解,形成连通的孔道,验证水溶性纤维有效溶解,形成孔道。常温养护情况下加了纤维的试块更具有韧性,压裂过程表现出延性破坏,而只加入增强剂组,试块的强度大,其破碎过程比较迅速,表现出断裂脆性。

只添加增强剂组的试块孔隙度最低,并且在水中高温养护对其孔隙度影响也并不大。而加入纤维的试块,孔隙度都较高,并且在高温水中养护对其孔隙度的影响较高,养护时间越久,其孔隙度越高。说明在90℃水浴条件下,水溶性纤维有效降解,形成孔隙通道提高渗透性。这一现象说明研制适用于中低温地热井的暂堵型高透水多孔固结材料现实可行性,简化地热资源的勘探开发过程,利于降低钻井成本和风险。

加入增强剂和纤维都会提高浆液的密度。两者混合缩短得最为明显,所有试块的初凝及终凝时间与标准G级水泥块的时间相比都有所缩短。增强剂和纤维都会减少水泥的凝结时间,而两者相比,纤维降低凝结时间的效果更为明显。相比油井水泥浆另外3组配方初凝和终凝时间都有明显下降。初凝时间都低于规定的最长时间,符合标准。初凝终凝时间间隔在1h以内,保持在较短时间,较大改善了水泥凝结时间,满足地热开采油井水泥要求。

#### 参考文献:

- [1] 贾军. 建造EGS的高温地热钻井技术[R]. 成都:中国地质学会地热专业委员会, 2018.
- [2] 唐胜利, 闫鸽, 徐堪社. 牛场区块煤层气钻井堵漏技术研究[J]. 陕西煤炭, 2019, 38(1): 26-29.
- [3] 钱洪强, 王娟, 孙玉东, 等. 天津地区地热钻井中地层漏失分析及堵漏方法选择[J]. 地质调查与研究, 2016, 39(3): 226-230.
- [4] 季菊香. 堵漏技术研究新进展[J]. 石化技术, 2018, 25(10): 34.
- [5] Tuttle J, Listi R. A new geothermal drilling fluid: providing temperature stability, inhibition, and cost-effectiveness for worldwide applications [J]. GRC Transactions, 2003, 27: 47-51.
- [6] 韩金, 李宝泰. 盐井施工中刘家沟地层漏失及堵漏技术[J]. 陕西煤炭, 2018, 37(1): 137-138, 79.
- [7] Gao X, Xu Q L, Brouwers H J H. Characterization of alkali activated slag-fly ash blends containing nano-silica[J]. Construction and Building Materials, 2015, 98: 397-406.
- [8] 李飞跃. EGS地热井矿渣/粉煤灰可自降解水泥的实验研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2015.
- [9] JGJ/T 70—2009, 建筑砂浆基本性能试验方法标准[S].
- [10] GB/T 17671—1999, 水泥胶砂强度检验方法(ISO法)[S].
- [11] GB/T 19139—2012, 油井水泥试验方法[S].
- [12] Sugama T, Pyatina T. Effect of sodium carboxymethyl celluloses on water-catalyzed self-degradation of 200 degrees C-heated alkali-activated cement[J]. Cement and Concrete composites, 2015, 55: 281-289.
- [13] Sugama T, Pyatina T. Utilization of PVA flakes in promoting self-degradation of temporary cementitious fracture sealing material[J]. GRC Transactions, 2014, 38: 331-338.
- [14] 凌妍, 钟娇丽, 唐晓山, 等. 扫描电子显微镜的工作原理及应用[J]. 山东化工, 2018, 47(9): 78-79+83.
- [15] 蹇黎明, 王胜, 陈礼仪, 等. 地热开采低密度固井水泥试验研究[C]//中国地质学会. 中国地质学会探矿工程专业委员会, 2019.