

# 中深地热井复杂地层钻进高温钻井液研制

吴景华, 冯海涛, 谢俊革, 吕涛, 魏四平, 戚波

(长春工程学院, 吉林 长春 130021)

**摘要:**近年来我国地热行业发展迅速,地热资源开发与利用的重要性显著提升。为有效钻进复杂地层中深地热井,本文针对中深地热井钻遇水敏性地层、涌水地层以及破碎松散等复杂地层和孔内高温出现的技术问题,在大量试验基础上初选了抗高温钻井液配方,通过正交试验确定了优选配方。经有效测试,钻井液在120℃高温条件下的滤失量为8.4 mL,漏斗黏度为24 s,动切力为1.43 Pa,表观黏度为14.5 mPa·s,塑性黏度为13.1 mPa·s,pH为8,密度为1.04 g/cm<sup>3</sup>,在120℃温度下钻井液流动48 h抗老化性能良好。表明研制的用于中深地热井(3000 m左右)钻进的抗高温钻井液能满足中深地热井钻进需求,具有良好的流变性、抗高温性、抗老化性及失水造壁性,能有效解决中深地热井复杂地层钻进的问题。

**关键词:**中深地热井;复杂地层;抗高温;钻井液;性能测试

**中图分类号:**P634.6;TE254 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)05-0061-06

## Research and development of high-temperature drilling fluid for complex strata in deep geothermal wells

WU Jinghua, FENG Haitao, XIE Junge, LÜ Tao, WEI Siping, QI Bo

(Changchun Institute of Technology, Changchun Jilin 130021, China)

**Abstract:** In recent years, the geothermal sector in China has witnessed rapid growth, and the significance of the development and utilization of geothermal resources has significantly escalated. To effectively drill medium-deep geothermal wells in complex strata, this paper focuses on the technical drilling issues that arise in medium-deep geothermal wells when penetrating water-sensitive strata, water-gushing strata, fractured and loose complex strata, as well as high temperatures within the boreholes. Based on a large number of experiments, an initial selection of high-temperature-resistant drilling fluid formulations was made. The optimal formulation was determined through orthogonal experiments. Through effective tests, the water loss of the drilling fluid at a high temperature of 120°C in the well was 8.4mL, the funnel viscosity was 24s, the yield point was 1.43Pa, the apparent viscosity was 14.5mPa·s, the plastic viscosity was 13.1mPa·s, the pH value was 8, the density was 1.04g/cm<sup>3</sup>, and the anti-aging performance of the drilling fluid flowing for 48 hours at 120°C was excellent. It indicates that the high-temperature-resistant drilling fluid developed for medium-deep geothermal well drilling (around 3000m) can meet the requirements of medium-deep geothermal well drilling, featuring good rheological properties, high-temperature resistance, anti-aging properties, and water loss and wall-building properties, and can effectively address the problems encountered during the drilling of medium-deep geothermal wells in complex strata.

**Key words:** medium-deep geothermal well; complex formation;high-temperature resistance; drilling fluid; performance test

### 0 引言

随着“双碳”理念不断深入人心,地热资源的开发利用受到越来越多的重视<sup>[1]</sup>,许多国家的地热行

业发展迅速。作为世界上地热资源最为丰富的国家之一,我国地热行业近些年来发展迅速<sup>[2-3]</sup>,但依然存在一些问题。在一些中深层地热井钻进中,经

收稿日期:2024-12-09;修回日期:2025-03-20 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.05.008

基金项目:吉林省发展和改革委员会项目“吉林省地热能开发利用产业化关键技术研究”(编号:2023C033-3)

第一作者:吴景华,男,汉族,1964年生,教授,岩土工程专业,博士,长期从事地质钻探技术研究和教学工作,吉林省长春市朝阳区同志街3066号,779521616@qq.com。

引用格式:吴景华,冯海涛,谢俊革,等.中深地热井复杂地层钻进高温钻井液研制[J].钻探工程,2025,52(5):61-66.

WU Jinghua, FENG Haitao, XIE Junge, et al. Research and development of high-temperature drilling fluid for complex strata in deep geothermal wells[J]. Drilling Engineering, 2025,52(5):61-66.

常受到高温高压以及复杂地层等因素影响,导致地热资源勘查开发受阻。钻井液作为钻井工程中的“血液”,在钻井作业中发挥着不可替代的作用。近年来我国地热井钻井液体系呈现多元化发展趋势,各类体系不断涌现,主要包括抗高温水基钻井液、抗高温油基钻井液等<sup>[4]</sup>。但随着钻井液成本与环保等要求日益提高,现有的钻井液性能已经不能完全满足地热井工程需求。以工业废弃物为原料开发钻井液外加剂已成为当前研究的重要方向之一,这一趋势在钻井液原材料价格持续攀升的背景下具有重要意义<sup>[5]</sup>。与此同时,钻井液护壁和堵漏等性能要求也日益提高<sup>[6]</sup>。目前我国勘查开发利用的中深层地热资源埋深一般在3000 m左右,少部分埋深可达4000 m,地热温度主要在120 ℃以下。基于上述要求,本研究旨在研制一种兼具环境友好性、经济性和工程适用性的地热井钻井液体系,以满足复杂地层钻进需求,并为中深层地热资源的高效开发提供技术支撑。

## 1 复杂地层类型

与中深地热井钻进相关的复杂地层主要有水敏地层、涌水地层以及破碎松散地层等。

### 1.1 水敏地层

水敏地层是以黏土矿物为主,如蒙脱石含量较高的泥页岩、千枚岩及页岩等。在水敏性地层中,井壁遇水易膨胀,从而发生剥落坍塌造成缩径,此外黏土易分散造浆改变钻井液流变性能<sup>[7-8]</sup>。在水敏性地层钻进时,应当使用滤失量较低、抑制性较强的钻井液体系<sup>[9]</sup>。

### 1.2 涌水地层

涌水地层一般具有地下水位较高、水流速度较快、地层压力较大等特点,施工时地下水易通过裂隙进入井内从而造成垮塌。在这类地层钻进时,应提高钻井液密度,从而能够平衡地层压力,减少涌水事故发生<sup>[10]</sup>。

### 1.3 破碎松散地层

破碎松散地层大多是在构造作用或者风化作用的影响下形成,这类地层通常胶结性差,有较为发育的裂隙,因此井壁岩石的稳定性较差,钻进时易成块掉落,可能会出现塌孔以及卡钻等孔内事故<sup>[11]</sup>。当遇到松散破碎地层时,应适当提高钻井液的黏度和切力,使其能起到支撑井壁的作用<sup>[12]</sup>。

## 2 中深地热井钻进对钻井液的性能要求

钻井液作为钻井工程中的关键工作液体,其性能直接影响钻井作业的效率和安全。钻井液的主要性能指标包括流变性、失水护壁性、pH及密度等。而在地热井钻井施工中,由于面临高温高压和复杂地层条件,钻井液还需具备优异的抗高温和抗老化性能。我国的中深层地热资源一般为埋深在2000~3000 m的水热型地热资源,依据构造成因可分为沉积盆地型和隆起山地型地热资源<sup>[13]</sup>,其平均地温梯度约为3.2 ℃/100 m<sup>[14]</sup>,井底可能更高,从而对钻井液中的部分组分产生较大影响<sup>[15-16]</sup>。因此中深层地热井钻进的钻井液应具备抵抗至少120 ℃高温的能力,在钻井施工过程中高温高压环境下依然能保持性能稳定。此外,地热井钻进过程中,钻井液始终处于循环状态,考虑起下钻等特殊工况,其在井内停留时间一般不超过48 h。因此为保障钻井作业顺利进行,需要测试钻井液高温流动一定时间后的各项性能指标,以评估其抗老化性能。

根据《地热钻探技术规程》(DZ/T 0260—2024)及以往工程经验,确定地热井钻井液各项性能指标的合理范围(见表1)。

表1 地热井(120 ℃)钻井液性能指标

Table 1 Performance indicators of drilling fluid (120 ℃)

性能参数	参数值
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.03~1.08
漏斗黏度/s	20~30
滤失量/mL	<10
pH	8~8.5
抗老化时间/h	48

## 3 高温地热井钻井液研制

### 3.1 组分构成

经过大量试验初步确定以钠膨润土为造浆材料,采用试剂LM和水解聚丙烯腈-铵盐(NH<sub>4</sub>-HPAN)作为降失水剂,磺化单宁(SMT)作为降黏剂,纯碱(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)作为pH调节剂。

### 3.2 作用机理

钠膨润土的主要成分为蒙脱石,具有造浆性能好、滤失量低等特点,且采用膨润土配制的钻井液成本较低,配制过程相对简便,是研制地热井钻井液较好的造浆材料<sup>[17-18]</sup>。NH<sub>4</sub>-HPAN是由腈纶丝在高温

高压下水解制得,含有的各类基团使其具备较好的降滤失作用、良好的热稳定性、一定的抗盐能力,且能改善钻井液流变性能。此外  $\text{NH}_4^+$  具有抑制黏土水化分散的作用,具有一定的防塌效果,经常被应用于各类钻井液中<sup>[19-20]</sup>。降失水剂 LM 能够使泥浆成为较为稳定的悬浮体系,在井壁形成低渗透性、薄而坚韧的滤饼。SMT 是一种天然高分子的改性产物,作为“三磺”钻井液<sup>[21-22]</sup>的原料之一,具有较好的热稳定性和稳定的降黏、降失水效果,可以抵抗 180~200 °C 高温,是性能较好的抗高温降黏剂<sup>[23]</sup>。

### 3.3 正交试验设计

结合大量室内试验和工程经验,初步得出钻井液各组分的合理取值范围如下:膨润土 4%~5%,  $\text{NH}_4\text{-HPAN}$  1.4%~1.6%, 降失水剂 LM 1.4%~1.8%, SMT 0.8%~1%。设计正交试验为四因素三水平,见表 2。此外,为保证钻井液性能稳定,工作环境应处于弱碱性环境,因此在进行每组正交试验时,均往钻井液中加入 0.35% 纯碱,使不同组别的钻井液 pH 维持在 7~8。

### 3.4 正交试验数据分析

各组正交试验操作流程如下:将钠膨润土、纯

碱与纯净水按照相应比例均匀混合,用电动搅拌机高速搅拌后,按序分别加入 SMT、 $\text{NH}_4\text{-HPAN}$ 、LM,每加入 1 种组分后高速搅拌,使各组分均匀分散。搅拌完成后,分别测量各组钻井液以下评价指标:漏斗黏度(FV)、表观黏度(AV)、塑性黏度(PV)、动切力(YP)、岩样浸泡 48 h 后状态、pH、API 滤失量(API FL)以及高温高压滤失量(HTHP FL),各组试验均重复 3 次并取平均值,数据见表 3。对各组试验的性能数据进行极差分析,结果见表 4。分析正交试验数据,计算各因素对各评价指标的极差大小,得出各因素的主次关系见表 5。

根据实践经验,高温高压滤失量对地热井钻井液性能评价的重要性相对较高。通过对试验数据进行方差分析可知,膨润土、 $\text{NH}_4\text{-HPAN}$ 、LM、SMT 4 种组分对钻井液滤失量的影响递减,在确定 4 种组分掺量时,需基于高温高压滤失量的数据分析进行综合考量,得出钻井液的最优配方:5% 钠膨润土+1.5% $\text{NH}_4\text{-HPAN}$ +1.8%LM+0.8%SMT。

## 4 钻井液性能测试

### 4.1 流变性

采用苏氏漏斗测量该钻井液的漏斗黏度约为 24 s。研制的钻井液为低固相钻井液体系,属于宾汉塑性流体,采用六速旋转黏度计测量流变参数,表观黏度 14.5 mPa·s,动切力 1.43 Pa,塑性黏度 13.1 mPa·s,均在合理范围内。

### 4.2 失水造壁性

#### 4.2.1 API 失水造壁性能测试

钻井液的 API 滤失量采用泥浆滤失量测定仪

表 2 正交试验水平因素

Table 2 The orthogonal experiment factor level

水平	因 素			
	A	B	C	D
	膨润土/%	$\text{NH}_4\text{-HPAN}/\%$	LM/%	SMT/%
1	4.0	1.4	1.4	0.8
2	4.5	1.5	1.6	0.9
3	5.0	1.6	1.8	1.0

表 3 正交试验结果

Table 3 The orthogonal experiment results

序号	膨润土 /%	$\text{NH}_4\text{-HPAN}/\%$	LM/%	SMT/%	FV/s	AV/(mPa·s)	YP/Pa	PV/(mPa·s)	pH	岩样浸泡 48 h 后状态	API FL/mL	HTHP FL/mL
1	4	1.4	1.4	0.8	21.2	10.2	0.63	9.57	8	不散	7.57	10.20
2	4	1.5	1.6	0.9	21.9	11.4	1.38	10.03	8	不散	7.20	9.57
3	4	1.6	1.8	1	23.1	13.5	1.99	11.50	8.5	不散	6.93	9.40
4	4.5	1.4	1.6	1	23.5	13.9	1.38	12.53	8	不散	7.23	9.43
5	4.5	1.5	1.8	0.8	25.3	14.7	2.52	12.20	8	不散	5.90	8.50
6	4.5	1.6	1.4	0.9	21.7	11.2	1.00	10.17	8.5	不散	7.13	9.80
7	5	1.4	1.8	0.9	24.4	14.6	1.64	12.97	8	不散	6.20	8.57
8	5	1.5	1.4	1	22.5	12.2	1.07	11.13	8	不散	6.53	9.37
9	5	1.6	1.6	0.8	23.6	13.7	1.36	12.40	8.5	不散	7.47	9.10

注:各组放入岩样浸泡 48 h 后均不散开,且 pH 均在合理范围内,故后续不做极差分析。

表4 正交试验数据分析

Table 4 The orthogonal experimental data analysis

性能指标	极差	因素			
		A 膨润土	B NH <sub>4</sub> -HPAN	C LM	D SMT
HTHP FL	K <sub>1</sub>	29.17	28.20	29.37	27.80
	K <sub>2</sub>	27.73	27.43	28.10	27.93
	K <sub>3</sub>	27.03	28.30	26.47	28.20
	R	2.13	0.87	2.90	0.40
API FL	K <sub>1</sub>	21.70	21.00	25.83	20.93
	K <sub>2</sub>	20.27	19.63	21.90	20.53
	K <sub>3</sub>	20.20	21.53	19.03	20.70
	R	1.50	1.90	6.80	0.40
FV	K <sub>1</sub>	66.20	69.07	65.30	70.10
	K <sub>2</sub>	70.47	69.67	69.03	67.97
	K <sub>3</sub>	70.50	68.43	72.83	69.10
	R	4.30	1.23	7.53	2.13
AV	K <sub>1</sub>	35.02	38.63	33.52	38.58
	K <sub>2</sub>	39.70	38.23	39.00	37.10
	K <sub>3</sub>	40.48	38.33	42.68	39.52
	R	5.47	0.40	9.17	2.42
PV	K <sub>1</sub>	31.10	35.07	30.87	34.17
	K <sub>2</sub>	34.90	33.37	34.97	33.17
	K <sub>3</sub>	36.50	34.07	36.67	35.17
	R	5.40	1.70	5.80	2.00
YP	K <sub>1</sub>	4.00	3.65	2.71	4.51
	K <sub>2</sub>	4.91	4.97	4.12	4.02
	K <sub>3</sub>	4.07	4.36	6.15	4.45
	R	0.90	1.33	3.44	0.49

表5 正交试验因素主次关系

Table 5 The primary and secondary relationships of orthogonal experimental factors

性能指标	主 次			
HTHP FL	C	A	B	D
API FL	C	B	A	D
FV	C	A	D	B
AV	C	A	D	B
PV	C	A	D	B
YP	C	B	A	D

进行测定,试验环境温度20~25℃,液灌内外压差0.7 MPa,失水过滤面积约45.3 cm<sup>2</sup>,测量时间为30 min。测得该配方钻井液的API滤失量为5.8 mL,试验所得泥饼质量较好,薄且坚韧。

#### 4.2.2 高温高压失水造壁性能测试

采用高温高压失水仪分别测量钻井液在90、100、120、150℃环境下的滤失量,评估钻井液抗高温性能。试验时该仪器的测量失水面积为22.6 cm<sup>2</sup>,具体试验参数及试验结果见表6。钻井液的高温高压滤失量与试验温度的变化关系曲线见图1。

表6 高温高压滤失试验参数及试验结果

Table 6 HTHP filtration experimental parameters

温度/℃	始压(钻井液室压力)/MPa	回压(接收室室压力)/MPa	滤失量/mL
90	3.15	0	6.8
100	4.14	0.67	7.9
120	4.14	0.67	8.4
150	4.48	1.03	10.1

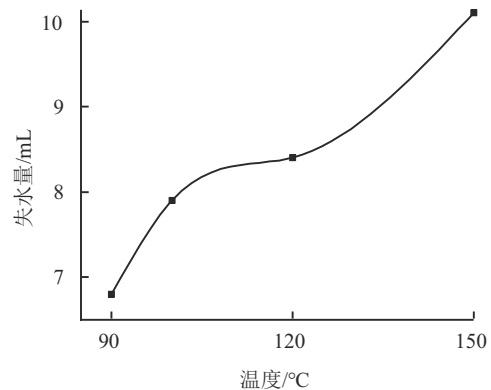


图1 高温高压滤失量与试验温度变化关系

Fig.1 The relationship between HTHP FL and experimental time

在150℃以下的温度条件下,随着温度升高,钻井液的滤失量缓慢增加,特别是在120℃及以下,钻井液滤失量均控制在10 mL以内,符合性能要求。这一温度范围内试验的泥饼质量保持良好,薄且韧。可以看出,该钻井液在120℃及以下的高温环境中滤失量符合要求,且具有良好的护壁性能。

#### 4.3 pH

采用pH试纸测得该钻井液的pH为8,呈弱碱性。符合地热井钻井液pH要求。

#### 4.4 密度

钻井液密度采用泥浆比重计进行测量,测得该钻井液的密度为1.04 g/cm<sup>3</sup>,符合地热井钻井液密度要求。

### 4.5 抗老化性

#### 4.5.1 试验设计及数据

采用高温滚子加热炉模拟钻井液在地热井内循环工作,并通过高温流动后泥浆的特性来评价钻

井液的抗老化性能。试验操作如下:将配制好的钻井液放置在预设温度为120℃的高温滚子加热炉内,分别滚动加热16、32、48 h,并测量滚动加热后钻井液的各项性能数据,试验结果见表7。

表7 抗老化试验结果

Table 7 Anti-aging experimental results

序号	高温滚动时长/h	FV/s	AV/(mPa·s)	YP/Pa	PV/(mPa·s)	pH	岩样浸泡48 h后状态	HTHP FL/mL
1	0	24	14.5	1.43	13.1	8	不散	8.4
2	16	26	16.8	1.53	15.3	8	不散	8.8
3	32	27.5	18.2	1.74	16.5	8.5	不散	9.3
4	48	29	18.7	1.94	16.8	8.5	不散	9.8

#### 4.5.2 试验结果分析

(1)滤失量变化。钻井液120℃的高温高压滤失量与高温滚动时间关系见图2。高温高压滤失量随高温滚动时间的增加而缓慢增长,在高温滚动48 h内,滤失量均小于10 mL,符合实际工程要求。

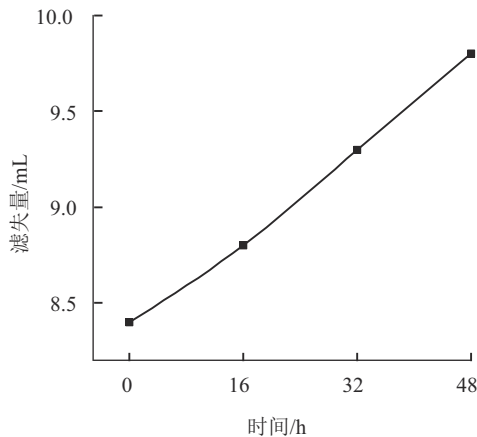


图2 高温高压滤失量与高温滚动时间变化关系  
Fig.2 The relationship between HTHP FL and experimental time

(2)流变性能变化。钻井液流变参数与高温滚动时间关系见图3。经120℃高温滚动后的钻井液漏斗黏度、表观黏度、动切力和塑性黏度等流变性能参数均随高温滚动时间的增加而缓慢上升,各项流变性能的参数变化均在合理范围内。

综上所述,该钻井液在高温滚动48 h后,性能保持稳定,具有较好的抗老化性能。

### 5 结论

(1)通过正交试验测试,中深复杂地层地热井钻井液的优选配方:5% 钠膨润土+1.5%NH<sub>4</sub>-

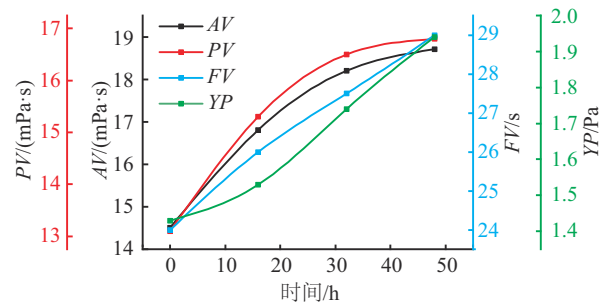


图3 流变参数与高温滚动时间变化关系  
Fig.3 The relationship between rheological parameters and experimental time

HPAN+1.8%LM+0.8%SMT。

(2)该钻井液各项性能参数:API滤失量5.8 mL,120℃高温高压滤失量8.4 mL,漏斗黏度24 s,动切力1.43 Pa,表观黏度14.5 mPa·s,塑性黏度13.1 mPa·s,pH 8,密度1.04 g/cm<sup>3</sup>,各项性能均符合实际工程要求。

(3)该钻井液抗老化性能好、配制简便、成本较低、绿色环保,抗高温性能达120℃,适用3000 m左右的水敏、涌水、松散破碎等复杂地层地热井施工。

### 参考文献(References):

[1] 张沈习,王丹阳,程浩忠,等.双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J].电力系统自动化,2022,46(8):189-207. ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and Carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(8):189-207.

[2] 周总瑛,刘世良,刘金侠.中国地热资源特点与发展对策[J].自然资源学报,2015,30(7):1210-1221. ZHOU Zongying, LIU Shiliang, LIU Jinxia. Study on the characteristics and development strategies of geothermal resources in China[J]. Journal of Natural Resources, 2015,30(7):1210-1221.

- [3] 许刘万,伍晓龙,王艳丽.我国地热资源开发利用及钻进技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(4):1-5.  
XU Liuwan, WU Xiaolong, WANG Yanli. Development and utilization of geothermal resource in China and the drilling technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(4):1-5.
- [4] 庞少聪,安玉秀,田野.抗高温钻井液体系国内外研究进展与发展建议[J].钻探工程,2024,51(4):82-92.  
PANG Shaocong, AN Yuxiu, TIAN Ye. Research progress and development suggestions of high-temperature resistant drilling fluid systems at home and abroad[J]. Drilling Engineering, 2024,51(4):82-92.
- [5] 庞少聪,安玉秀,马京缘.近十年国内钻井液降粘剂研究进展[J].钻探工程,2022,49(1):96-103.  
PANG Shaocong, AN Yuxiu, MA Jingyuan. Research progress of domestic drilling fluid viscosity reducer in recent ten years[J]. Drilling Engineering, 2022,49(1):96-103.
- [6] 伍晓龙,杜焱森,王庆晓,等.冀中拗陷区域JZ04地热勘探井施工技术[J].钻探工程,2023,50(1):107-114.  
WU Xiaolong, DU Yaosen, WANG Qingxiao, et al. Construction technology of JZ04 geothermal exploration well in Jizhong Depression[J]. Drilling Engineering, 2023,50(1):107-114.
- [7] 张益飞.苏南地区复杂地层地热钻井冲洗液研究与应用[J].地质与勘探,2013,49(6):1170-1175.  
ZHANG Yifei. The research and application of geothermal drilling flushing fluid to complex formations in south Jiangsu[J]. Geology and Exploration, 2013,49(6):1170-1175.
- [8] 王勇军.水敏性地层地热钻井液应用分析[J].科技视界,2015(1):162,187.  
WANG Yongjun. Application analysis of geothermal drilling fluid in water sensitive formations[J]. Science & Technology Vision, 2015(1):162,187.
- [9] 自然资源部.地热钻探技术规程: DZ/T 0260-2024[S].北京:中国标准出版社,2024.  
Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. Code of practice for geothermal drilling: DZ/T 0260-2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.
- [10] 靖向党.钻孔工程[M].北京:冶金工业出版社,1999.  
JING Xiangdang. Drilling Project[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999.
- [11] 陈建兵,王振福.关中盆地地热钻井施工常见问题预防及处理方法探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(7):21-27.  
CHEN Jianbing, WANG Zhenfu. Prevention and treatment of common problems in geothermal drilling in Guanzhong Basin[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(7):21-27.
- [12] 胡继良.复杂地层地质钻探冲洗液研究与应用[D].北京:中国地质大学(北京),2012.  
HU Jiliang. Research and application of complex formation geological drilling fluid[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2012.
- [13] 王贵玲,刘彦广,朱喜,等.中国地热资源现状及发展趋势[J].地学前缘,2020,27(1):1-9.  
WANG Guiling, LIU Yanguang, ZHU Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020,27(1):1-9.
- [14] 王贵玲,张薇,梁继运,等.中国地热资源潜力评价[J].地球学报,2017,38(4):448-459.  
WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017,38(4):448-459.
- [15] 刘畅,冉恒谦,许洁.干热岩耐高温钻井液的研究进展与发展趋势[J].钻探工程,2021,48(2):8-15.  
LIU Chang, RAN Hengqian, XU Jie. Research progress and development trend of high-temperature drilling fluid in hor dry rock[J]. Drilling Engineering, 2021,48(2):8-15.
- [16] 施里宇,李天太,张喜凤,等.温度和膨润土含量对水基钻井液流变性的影响[J].石油钻探技术,2008,36(1):20-22.  
SHI Liyu, LI Tiantai, ZHANG Xifeng, et al. Effects of temperature and clay content on Water-based drilling fluids' rheological property[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008,36(1):20-22.
- [17] 李娜,马建中,鲍艳.蒙脱土改性研究进展[J].化学研究,2009,20(1):98-103.  
LI Na, MA Jianzhong, BAO Yan. Development on modification of montmorillonite[J]. Chemical Research, 2009,20(1):98-103.
- [18] 徐同台,卢淑芹,何瑞兵,等.钻井液用封堵剂的评价方法及影响因素[J].钻井液与完井液,2009,26(2):60-62,68.  
XU Tongtai, LU Shuqin, HE Ruibing, et al. Methods for evaluating drilling fluid sealing and plugging agents and the influential factors[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2009,26(2):60-62,68.
- [19] 刘恒,杨胜春,纪卫军.张集煤矿多分支井强封堵防塌钻井液体系研究及应用[J].钻探工程,2024,51(S1):368-372.  
LIU Heng, YANG Shengchun, JI Weijun. Study and application of drilling fluid system for strong plugging and collapse prevention in multi-branch wells of Zhangji coal mine[J]. Drilling Engineering, 2024,51(S1):368-372.
- [20] 黄聿铭,张金昌,杨钦明.钾铵聚合物钻井液在地热钻井中的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):265-268.  
HUANG Yuming, ZHANG Jinchang, YANG Qinming. Research and application of potassium-ammonium polymer drilling fluid suitable for geothermal well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(10):265-268.
- [21] 王中华.国内钻井液及处理剂发展评述[J].中外能源,2013,18(10):34-43.  
WANG Zhonghua. The development overview on the domestic drilling fluids and drilling fluid additives[J]. Sino-global Energy, 2013,18(10):34-43.
- [22] 吴景华,吕涛,谢俊革,等.中深层地热井新型耐高温固井材料研制[J].钻探工程,2025,52(4):61-68.  
WU Jinghua, LÜ Tao, XIE Junge, et al. Development of new high-temperature-resistant cementing materials for medium-deep geothermal wells[J]. Drilling Engineering, 2025,52(4):61-68.
- [23] 曲书堂,戴春亭.磺化单宁降粘效果的评价[J].钻井液与完井液,1992,9(6):41-42,46.  
QU Shutang, DAI Chunting. Evaluation of thinning effect of sulfonated tannin[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 1992,9(6):41-42,46.

(编辑 王跃伟)