

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.201704005

# 中低温地热井钻井完井工艺技术研究与实践

王培义, 马鹏鹏, 张贤印, 杨 卫

(中国石化新星石油有限责任公司, 北京 100083)

**摘 要:**为了提高中低温地热井工程质量,保障单井产能,优化了地热井钻井完井工艺技术,形成了适用于砂岩热储的二开井身结构和适用于基岩热储的三开井身结构;采用悬挂器连接、连接重叠段固井水泥密封的方式,防止泵室段底部水层窜通;优化了适用于不同地区、不同储层完井的花管、绕丝筛管和割缝衬管的设计参数;针对热储层极易漏失的特点,发展了钻井液正循环钻进、清水正循环钻进、清水充空气正循环钻进和气举反循环钻进等4种钻进工艺;根据生产需求,明确了地热井测井参数要求、固井技术要点及组合洗井工艺。该技术在清丰 XBXZ-1 井现场应用后,下入多级泵试水 24 h,流量 120 m<sup>3</sup>/h,水温 68 ℃,静液面 15.50 m,动液面 48.00 m。中低温地热井钻井完井工艺成功解决了地热钻井完井过程中存在的钻井液漏失严重、水位衰减快、沉砂严重和开采水层与表层水之间的互窜等问题,具有较好的推广应用价值。

**关键词:** 中低温;地热井;钻井;完井

**中图分类号:** TE314.1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1001-0890(2017)04-0027-06

## Drilling and Completion Technologies for of Geothermal Wells with Medium and Low Temperatures

WANG Peiyi, MA Pengpeng, ZHANG Xianyin, YANG Wei

(Sinopec Star Petroleum Co., Ltd., Beijing, 100083, China)

**Abstract:** To enhance the engineering quality of geothermal wells and to obtain desirable single well productivity, geothermal drilling and completion technologies have been optimized, and developed casing program with two sections suitable for geothermal development in sandstone formations and three sections suitable for matrix formations. Hanger connections, together with sealing by cementing slurry in overlapping sections have been developed to eliminate possibility of water channeling in bottom sections of the pumping chamber. In addition, design parameters for perforated PVC pipe, wire-wrapped screens and slot-lined liners are optimized to satisfy the demand of completion in different formations and different areas. Four drilling techniques, including mud circulation drilling, freshwater circulation drilling, gas-charged water circulation drilling and gas-lifting reverse circulation drilling, have been developed for thermal reservoir susceptible to lost-circulation. According to the requirement of production, logging parameters, cementing and integral flushing technologies in geothermal wells have been specified. The newly developed technologies have been deployed on site of the Well Qingfeng XBXZ-1, with multistage pump testing water for 24 h, flow rate of 120 m<sup>3</sup>/h, water temperature of 68 ℃, the static liquid level being 15.50 m, the dynamic liquid level being 48.00 m. Successful drilling and completion technologies for geothermal wells at medium or low temperatures can effectively eliminate severe lost circulation, fast drop in water levels, undesirable settling of cuttings, channeling of water between target formation and surface layer, etc. It has bright prospects in promotion and application.

**Key words:** low medium temperature; geothermal well; drilling; completion

根据 2015 年世界地热大会报告,世界范围的地热开发利用以每年 7% 左右的复合速率增长,地热资源的开发与应用具有十分广阔的前景<sup>[1-3]</sup>。国内的地热开发以中低温为主,主要用于建筑供暖,地热井井深多为 2 000~3 000 m<sup>[4-5]</sup>。地热井用于供暖需要下泵抽水、大排量产液和防砂防垢,对地热井的

**收稿日期:** 2017-03-10; **改回日期:** 2017-07-15。

**作者简介:** 王培义(1968—),男,山东单县人,1988年毕业于长春地质学院钻探工程专业,2006年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士学位,高级工程师,主要从事地热钻井完井方面的技术研究与管理工作。E-mail: hzwpy@163.com。

**基金项目:** 中国石化集团科技攻关项目“地热井关键技术研究”(编号:JP13003)部分研究内容。

井身结构设计提出了新的要求。地热井开采过程中存在出水量、水温、井口压力或静水位衰减快,沉砂严重,开采水层与表层水容易互窜,产能测试困难等问题,这些问题是当前地热井钻井完井的技术难题<sup>[6-12]</sup>。地热井施工成本较高,地热供暖项目利润较低,已经成为制约地热产业规模扩大的瓶颈。为此,笔者以河北、河南、山东、辽宁等地实际作业环境和地质条件为基础,开展了地热井钻井完井工艺技术研究,优化了各区域钻井完井工程设计,并开展现场实践验证了效果,形成了适合不同地区不同热储类型的钻井完井工艺技术,解决了地热井产能衰减、开采水层与表层水互窜和出砂等问题,保障了地热产业的规模快速发展。

## 1 井身结构优化

早期地热井比较浅,一般都采用单一井径。当前,地热资源开发以中深层为主,埋深1 500~4 000 m,早期地热井的井身结构已经不能满足要求,为此,以石油井为参考进行井身结构设计,根据热储类型采用二开或三开井身结构。

砂岩孔隙型热储地热井采用二开井身结构,一开表层泵室段( $\phi 339.7$  mm 套管)全部用水泥封固,二开完钻后有2种完井方式:第一种采用悬挂器悬挂 $\phi 177.8$  mm 套管, $\phi 177.8$  mm 滤水管以上部分用止水器止水;第二种采用悬挂器悬挂 $\phi 177.8$  mm 套管, $\phi 177.8$  mm 滤水管以上部分全部用水泥封固。

基岩裂隙型热储地热井采用三开井身结构:一开表层泵室段( $\phi 339.7$  mm 套管)全部用水泥封固;二开完钻后采用悬挂器悬挂 $\phi 244.5$  mm 技术套管,用水泥全封固;三开裸眼( $\phi 215.9$  mm)完井或下入 $\phi 177.8$  mm 滤水管完井。

## 2 钻进工艺优化

目前,地热井钻井主要采用钻井液正循环钻进工艺、清水正循环钻进工艺、清水充空气正循环钻进工艺和气举反循环钻进工艺。现场施工时以正循环钻进为主,积极推广使用气举反循环钻进工艺。据初步统计,与钻井液正循环相比,气举反循环的钻进效率提高1~2倍,钻探成本降低1/3,钻头寿命提高1~2倍,出水量增大1/3。

### 2.1 钻井液正循环钻进工艺

虽然地热井钻井的钻进工艺较多,但目前还是

以正循环钻进为主。钻井液设计和管理工作的关键是,正确处理漏失、井底高温、卡钻事故、腐蚀及环境保护等问题。漏失地层往往是热储地层,也是易发生涌喷的层位。在正常地层压力梯度下,常用钻井液的密度一般为1.05~1.20 kg/L,pH值为9.0~10.0,黏度为35~45 s,滤失量不大于5 mL。地热井钻井以牙轮钻头为主,个别地区使用PDC钻头。以西-THY探-1井为例,常用钻具组合如表1所示。

表1 西-THY探-1井钻具组合

Table 1 BHA for the Well Xi-THY E-1

井眼直径/ mm	井段/m	钻具组合
444.5	0~450	$\phi 444.5$ mm 钻头+ $\phi 203.2$ mm 无磁钻铤×1根+ $\phi 203.2$ mm 钻铤×2根+ $\phi 177.8$ mm 钻铤×6根+ $\phi 127.0$ mm 加重钻杆×15根+ $\phi 127.0$ mm 斜坡钻杆
311.1	450~1 715	$\phi 311.1$ mm 钻头+ $\phi 203.2$ mm 无磁钻铤×1根+ $\phi 203.2$ mm 钻铤×2根+ $\phi 177.8$ mm 钻铤×9根+ $\phi 127.0$ mm 加重钻杆×15根+ $\phi 127.0$ mm 斜坡钻杆
215.9	1 715~ 2 450	$\phi 215.9$ mm 钻头+ $\phi 215.0$ mm 螺旋稳定器+ $\phi 158.8$ mm 短钻铤×1根+ $\phi 215.0$ mm 螺旋稳定器+回压阀+ $\phi 158.8$ mm 无磁钻铤×1根+ $\phi 215.0$ mm 螺旋稳定器+ $\phi 158.8$ mm 钻铤×9根+ $\phi 127.0$ mm 加重钻杆×15根+ $\phi 127.0$ mm 斜坡钻杆

### 2.2 清水正循环钻进工艺

地热井用钻井液钻进热储层段容易污染储层,降低出水量,因此推荐采用清水作为循环介质进行正循环钻进。清水正循环钻进工艺具有钻速快、洗井效果好、保护热储层、对含水层伤害小、对环境无污染和成本低等优点;其缺点是影响井壁的稳定性和携岩能力低和大量岩屑充填在含水层裂隙中影响出水量。

### 2.3 清水充空气正循环钻进工艺

由于地热井储层段极易发生漏失,因此采取将空气注入清水中进行欠平衡钻进的技术措施,其优点主要是:1)采用清水充空气形成欠平衡状态,使地层水向井内连续流动,阻止清水进入水层,有利于保护热储层;2)消除压差型漏失;3)降低井筒内液柱压力,可提高钻速;4)消除正压差、不形成滤饼,可有效预防压差卡钻。不足之处是:由于空气在清水中很

容易滑脱聚集,因此正常钻进时对钻井施工配合和各工序时间控制的要求很高。例如,接单根时间过长时,环空内钻井液中的空气向上滑脱,形成段塞流,会造成钻井液喷出。

2.4 气举反循环钻进工艺

气举反循环钻进的优势在于:1)采用反循环建立抽汲负压系统,解决了漏失严重只进不返情况下的钻进问题;2)岩渣屑及流体介质均沿钻具中心通道上返,不与井壁及含水层发生接触,且反循环钻进过程同时是抽水洗井过程,有利于疏通含水层孔隙,简化了抽水洗井工序;3)避免了正循环钻进时流体介质高速上返对井壁的冲蚀,有利于保护井壁、防止坍塌和减少井内事故的发生;4)反循环通道过流断面面积较小,在满足最低气流上返速度的前提下所需压缩气体体积流量小,能够节省设备投资、降低空气压缩机燃油消耗;5)压缩气体、岩渣和钻井液等沿双壁钻具中心通道上返至地表后经排渣管排放到半封闭的箱体中,对环境污染小。该工艺如用清水钻进,还可节约钻井液,钻进过程同时又是洗井过程,与钻井液正循环钻进相比,具有出水量大、洗井时间短、不污染含水层和成井质量好的优点,现场应用效果较好,具有推广应用价值。

3 完井工艺优化

地热井完井工艺主要包括测井、固井、洗井和滤水管基本性能参数选择。

3.1 测井

地热井测井应考虑科研和生产的实际需求,具体参数及测量井段见表 2。现场施工时应根据实际情况选择相应的测井参数进行测井。

3.2 固井

地热井固井时,不同管径间的环空处,一定要用水泥封固,否则很可能会影响出水温度。二开井身结构的地热井,表层套管及滤水管以上部分全部采用油井水泥封固;三开井身结构的地热井,表层套管及技术套管部分全部采用油井水泥封固。

3.2.1 泵室段底部密封止水方式优化

早期地热井泵室段底部密封止水方式主要是异径连接密封和重叠挤水泥密封。

表 2 地热井测井参数汇总  
Table 2 Logging parameters collection for geothermal wells

次序	测井参数	测量井段
表层电测	自然伽马	井口—表层套管底
	自然电位	
	井径	
	深浅侧向	
其他电测	自然伽马	表层套管—井底
	自然电位	表层套管—井底
	井径	表层套管—井底
	深浅侧向	表层套管—井底
	声波时差	表层套管—井底
	补偿密度	表层套管—井底
	井温	井口—井底

异径连接密封是将泵室管与下部井管使用异径接头连接形成整体管串一次下入,两级井管间无薄弱点(见图 1)。

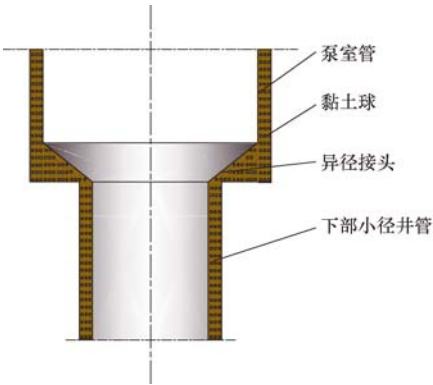


图 1 异径连接密封示意  
Fig. 1 Diagram of connection sealing with different diameters

重叠挤水泥密封是泵室管(表层套管)与下部井管(技术套管)重叠段采用挤水泥密封(见图 2)。该密封方式不易形成水泥环塞,自流地热井更适合采用技术套管戴帽固井技术。

20 世纪 90 年代,泵室段底部密封止水方式改进为悬挂连接密封,其基本原理就是将下部井管悬挂于泵室管底部,依靠两级井管间的特殊结构实现密封连接。根据密封接触面材料的不同,将其分为橡胶密封与金属密封。

悬挂连接采用橡胶密封时,通常是下泵室管底部连接小一级的井管收径头,下部井管顶部连接大一级的井管扩径头,扩径处加设橡胶层坐封于变径锥面处(见图 3)。

采用特制的悬挂器可实现悬挂连接金属密封,特制悬挂器由内套和外套 2 部分组成,内外套均选

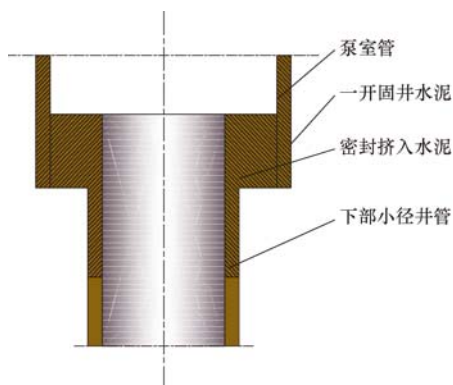


图2 重叠挤水泥密封(穿袖封固连接)示意

Fig. 2 Diagram of squeeze cementing seal of overlap segment

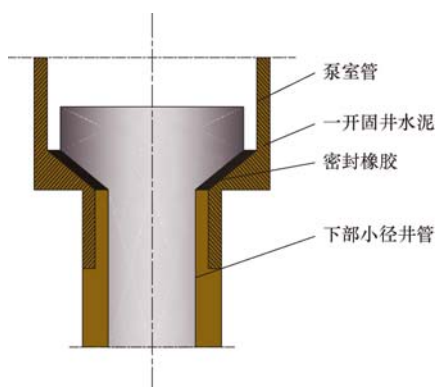


图3 悬挂连接橡胶密封示意

Fig. 3 Diagram of liner hanger connection with rubber seal

用高级合金钢锻造而成,可满足底部悬挂 4 000 m 长套管的要求。内套的密封锥面上熔涂 10 mm 厚的铅质,上部加工成反扣扣型,通过特制反扣接头连接钻杆入井,下端与下部井管相连;外套实质上为带内锥面的短节套管,可以连接于泵室段的任何位置。特制悬挂器的内套依靠铅质坐封于外套锥面上,使外套内锥面与内套外锥面配合形成密封连接(见图 4)。

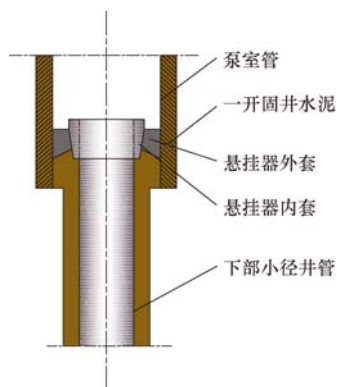


图4 悬挂连接金属密封示意

Fig. 4 Diagram of liner hanger connection with metal seal

悬挂连接水泥密封止水方式是从石油钻井结构中引进过来的,地热井泵室段底部采用悬挂器连接,滤水管以上用水泥封固。这种密封止水效果好,安全可靠,正在现场推广应用(见图 5)。

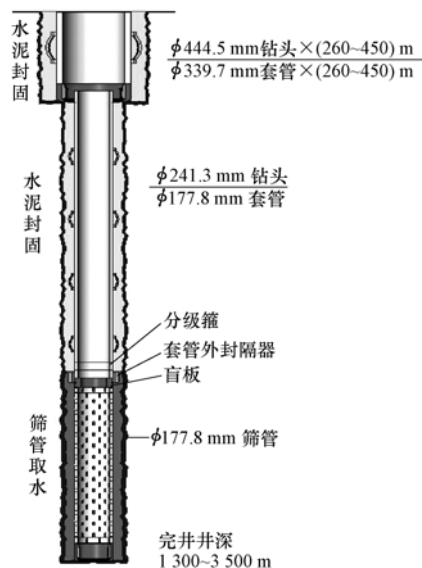


图5 悬挂连接水泥密封示意

Fig. 5 Diagram of liner hanger connection with cement seal

### 3.2.2 地热井环空密封止水方式优化

早期二开井身结构地热井开采段顶部采用在套管外设置橡胶托盘(伞式、孟式)或缠牛皮带、海带架桥,利用井壁自行垮塌和缩径的方式形成永久性的天然止水,但这种止水方式可靠性差,难以保证止水质量。目前,滤水管以上部分全部采用油井水泥封固的方式止水。

### 3.3 滤水管

滤水管的基本性能参数主要包括滤水孔直径,滤水管的长度、直径及防砂效果。目前,地热井常用的滤水管有以下 3 种:1)花管。适用于灰岩热储层,孔径 18.0 mm,横向孔距 55.0 mm,一圈 12 个孔。2)绕丝筛管。适用于砂岩热储层,基管打孔参数同花管,外包 80 目不锈钢筛网,缠 304 不锈钢丝,钢丝间距小于 0.5 mm。3)割缝衬管。适用于砂岩热储层,筛管缝长 100.0 mm,缝宽 0.3 mm,缝分布密度 580~600 条/m,过流流量可以达到 160~180 m<sup>3</sup>/h。

#### 3.3.1 试验方法与仪器

在防砂精度优化试验系统的长填砂筒中装填不同粒径的地层砂或砾石,在沉砂器中放置不同精度



的筛管小样,将地热井日产水量换算为驱替泵的排量进行出砂试验,采集不同排量时的流量、渗透率和压差等数据,并对采出液中的砂粒含量和粒径(粒度中值、最大粒径)进行分析。

### 3.3.2 采液强度对防砂效果的影响

采用粒径 0.425~0.850 mm(粒度中值 0.644 mm)的石英砂进行防砂筛管的防砂试验,结果表明,采液强度每增加  $1 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ ,含砂量增加 57%,采出砂最大粒径增加 2.3%。如果进行提液生产,应提高防砂精度,否则会引起地热井出砂。

### 3.3.3 滤水管直径对直井产能比的影响

不同直径的滤水管与直井产能比的关系如图 6 所示。从图 6 可以看出,滤水管精度一定时, $\phi 177.8 \text{ mm}$  滤水管的产能比比  $\phi 139.7 \text{ mm}$  滤水管高,这是由于  $\phi 177.8 \text{ mm}$  滤水管直径大,环空砂层薄,地热井的产能高,因此,在选择滤水管时,优先选用直径较大的滤水管,以提高地热井的产能。直井采用  $\phi 177.8 \text{ mm}$  滤水管完井其产能比采用  $\phi 139.7 \text{ mm}$  滤水管平均提高 4.44%。

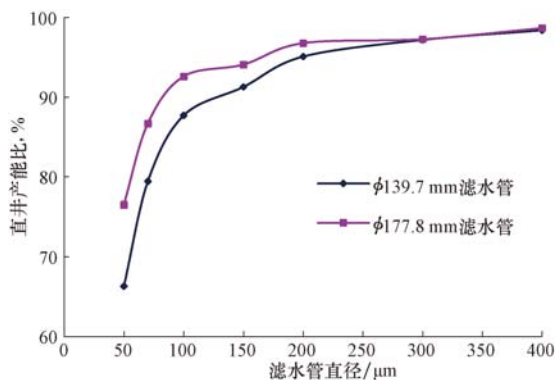


图 6 滤水管直径与直井产能比的关系曲线

Fig. 6 Relationship curve of filter tube diameter and productivity ratio for vertical wells

### 3.3.4 滤水孔直径

滤水孔直径必须与含水层粒度相适应。合理滤水孔直径的确定原则是允许含水层中 50%~70% 的细砂粒通过,使含水层井壁的剩余粗颗粒形成“圆形拱”。滤水管孔隙率的计算公式为:

$$m = \frac{S_k}{S_z} \quad (1)$$

式中:  $m$  为滤水管孔隙率;  $S_k$  为滤水管孔隙总面积,  $\text{m}^2$ ;  $S_z$  为滤水管表面积,  $\text{m}^2$ 。

滤水管孔隙率过大,滤水管强度降低;滤水管孔隙率过小,将产生堵水效应。合理的孔隙率应不小于地层的给水度。试验结果表明:圆孔、割缝滤水管的孔隙率为 20%~40%,网状滤水管的孔隙率为 20%~35%。

### 3.3.5 滤水管长度

设计滤水管长度时,应确定一个合理的有效长度。试验表明,随着滤水管长度增加,井内出水量亦逐渐增加,当增加到一定长度后,井内出水量增加率趋近于零。

对于粒度均匀的含水层,滤水管长度应为含水层厚度的 70%~80%;对于非均质含水层,滤水管长度应为含水层厚度的 30%~50%。

当含水层厚度大于 10.00 m,滤水管有效长度的计算公式为:

$$L = a \lg(1 + Q) \quad (2)$$

式中:  $L$  为滤水管的有效长度,  $\text{m}$ ;  $a$  为校正系数,与含水层和井身结构有关,一般取 17;  $Q$  为设计的设计产水量,  $\text{L/s}$ 。

## 3.4 洗井

地热井通常采用裸眼完井和滤水管完井 2 种完井方式。为了最大限度地获取地热水,地热井一般要采用多种洗井方法洗井,以便使地热井的出水量和水温达到设计要求,并尽量达到最佳出水量及水温。洗井方法一般可分为机械洗井和化学药剂洗井 2 类。机械洗井包括喷射洗井、气举洗井、活塞洗井和水泵抽水洗井;化学药剂洗井包括焦磷酸钠洗井、酸化洗井和液态二氧化碳洗井等。地热井洗井时,上述各种洗井方法基本不能单独使用,需要几种洗井方法组合在一起使用,才能形成一个完整的地热井洗井作业流程。

目前,砂岩热储地热井主要采用喷射洗井+气举洗井的洗井方法,基岩裂隙型热储地热井主要采用喷射洗井+酸化洗井(酸压洗井)+气举洗井的洗井方法。

## 4 现场应用

目前,陕西、河北、河南、山东、辽宁等地的砂岩热储地热井采用二开井身结构,基岩裂隙型热储地热井采用三开井身结构;储层上部地层用水泥全封固,以防止开采水层与表层水串通;根据储层地质特

点采用花管、绕丝筛管和割缝衬管完井;洗井工艺和方法优化组合,满足了各地区地热井钻井和完井工程的要求。

清丰香槟小镇探采1井完钻井深1 730.00 m,完钻层位为奥陶系马家沟组地层,目的层岩性为灰岩、白云岩。采用三开井身结构,二开技术套管采用悬挂器连接,技术套管采用水泥封固。热储段采用清水充空气正循环钻进工艺,在预防井漏的同时确保了连续钻进。三开滤水管采用花管完井。

该井采用气举洗井,将气和水按气、水、气、水、气、水的顺序交替注入管柱内,然后开泵注入清水将注入的气体经环空顶替出来。经过气举洗井后,水质基本变清,泥砂含量很小,说明气举吞吐洗井效果很好,成功清除了热储层内各种堵塞物,疏通了渗流通道。气举完毕,下入多级泵开始试水,多级泵下入深度168.00 m,用120 m<sup>3</sup>/h的流量试水24 h,测得静液面15.50 m,动液面48.00 m。

## 5 结论与建议

1) 中低温地热井已经在井身结构设计、低密度钻井液钻井、测井、固井、滤水管基本性能参数确定及防砂处理等方面形成了钻井完井系列特色技术,现场应用效果良好。

2) 高温地热井钻井面临着高温、地层坚硬、钻速低和成井质量不高等问题;目前还没有开展干热岩钻进相关技术研究工作,二者均需进行深入研究。

3) 随着地热资源开发深度的增加,环境保护问题日益突出,应高度重视钻井液处理、噪音污染和安全钻进(防喷、降温)等问题,坚持环境保护和经济效益协调一致的原则,保护生态平衡。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 曾义金. 干热岩能开发技术进展与思考[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(2): 1-7.  
ZENG Yijin. Technical progress and thinking for development of hot dry rock (HDR) geothermal resources[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(2): 1-7.
- [2] 韦雅珍, 王凤清, 任宝玉. 华北油区地热排采技术研究[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(增刊1): 93-95, 100.  
WEI Yazhen, WANG Fengqing, REN Baoyu. Drainage and production by using geothermal in Huabei oil region[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(supplement 1): 93-95, 100.
- [3] 蔡义汉. 地热直接利用[M]. 天津: 天津大学出版社, 2004: 45-68.  
CAI Yihan. Geothermal direct use[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2004: 45-68.
- [4] 徐军祥. 我国地热资源与可持续开发利用[J]. 中国人口·资源与环境, 2005, 4(2): 139-141.  
XU Junxiang. China's geothermal resources and its sustainable development and utilization[J]. China Population, Resources and Environment, 2005, 4(2): 139-141.
- [5] 王贵玲, 张发旺, 刘志明. 国内外热能开发利用现状及前景分析[J]. 地球学报, 2000, 21(2): 134-139.  
WANG Guiling, ZHANG Fawang, LIU Zhiming. An analysis of present situation and prospects of geothermal energy development and utilization in the world[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 2000, 21(2): 134-139.
- [6] 吕开河, 邱正松, 魏慧明, 等. 自适应防漏堵漏钻井液技术研究[J]. 石油学报, 2008, 29(5): 757-760, 765.  
LYU Kaihe, QIU Zhengsong, WEI Huiming, et al. Study on techniques of auto-adapting lost circulation resistance and control for drilling fluid[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(5): 757-760, 765.
- [7] 宋显民, 张立民, 李良川, 等. 水平井和侧钻水平井筛管顶部注水泥完井技术[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 119-121.  
SONG Xianmin, ZHANG Limin, LI Liangchuan, et al. Top screen pipe cementing technology of casing and liner in horizontal well and sidetracking horizontal well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 119-121.
- [8] 李国栋. 地热钻井技术的若干问题[J]. 地下水, 2008, 30(1): 85-86, 88.  
LI Guodong. Some problems of geothermal drilling technologies[J]. Ground Water, 2008, 30(1): 85-86, 88.
- [9] SAITO S. Recent geothermal well drilling technologies in Kakonda and Matsukaw[J]. Geothermal Resources Council Bulletin, 1991, 20(6): 166-175.
- [10] 鲁立强, 单正明, 邓发兵, 等. 肯尼亚 OLKARIA 地热井空气泡沫流体定向钻井综合技术研究[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(14): 4137-4139.  
LU Liqiang, SHAN Zhengming, DENG Fabing, et al. Study on geothermal well directional drilling with air foam in Kenya Olkaria[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(14): 4137-4139.
- [11] 程仲, 熊继有, 程昆. 随钻防漏堵漏技术机理的探讨[J]. 钻采工艺, 2008, 31(1): 36-39.  
CHENG Zhong, XIONG Jiyu, CHENG Kun. Mechanism analysis about the technology of leak protection and sealing with drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(1): 36-39.
- [12] CAENN R, DARLEY H C H, GRAY G R, et al. Composition and properties of drilling and completion fluids[M]. 6th ed. USA: Gulf Professional Publishing, 2011: 298-312.

[编辑 滕春鸣]