

基于压力平衡条件下“戴帽”固井注水泥技术探讨

景 龙¹, 李兴权¹, 鲍石磊¹, 李砚智², 张 成¹

(1. 河北省地矿局第三水文工程地质大队, 河北 衡水 053000; 2. 河北省地矿局第四水文工程地质大队, 河北 沧州 061000)

摘要:在地热井漏失地层进行“戴帽”固井注水泥难度大, 往往因挤入的水泥浆偏离设计位置而导致固井失败。本文提出了漏失层“戴帽”固井的技术思路, 即利用井内液柱压力与地层裂隙压力保持平衡以有效控制固井水泥浆柱移动位置, 通过控制挤注排量以防止水泥浆被稀释。在具体实施中, 可以采用开放固井和封闭固井两种方式。前者在注替浆过程中, 井筒与外界大气、上下井筒之间始终相通。当上下套管级差较大时, 水泥浆柱在平衡过程中下移距离较长, 位置不易控制, 且易稀释, 但是所需工具简单, 适合应用于上下套管级差较小的条件, 尤其是在同级套管内。对于后者而言, 需采用特殊密封工具封闭下部套管, 在注替浆过程中, 上下井筒始终是不通的。可以避免水泥浆柱下移距离长、位置不易控制、易稀释等缺点, 适合各种套管级配条件下固井注水泥作业, 在套管级差较大时更显其精确封固优势。

关键词:“戴帽”固井; 压力平衡; 开放固井; 封闭固井; 注水泥; 地热井

中图分类号: TE256 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)02-0079-06

Discussion of cement injection technology for “cap” cementation based on balanced pressure condition

JING Long¹, LI Xingquan¹, BAO Shilei¹, LI Yanzhi², ZHANG Cheng¹

(1.No.3 Team of Hydrogeology and Engineering Geology, Hebei Bureau of Geology and Mineral Exploration, Hengshui Hebei 053000, China;

2.No.4 Team of Hydrogeology and Engineering Geology, Hebei Bureau of Geology and Mineral Exploration, Cangzhou Hebei 061000, China)

Abstract: It is difficult to “cap” cement in the lost circulation formation of geothermal wells. In most cases, the well cementation is failure due to the deviation of the squeezed cement slurry from the design position. In this paper, the technical idea of “cap” cementation in lost circulation zone is proposed, that is, the moving position of the cement slurry column is effectively controlled by balancing the fluid column pressure in the well with the formation fracture pressure, and the cement slurry is prevented from being diluted by controlling the displacement of squeeze injection. Open cementing and closed cementing methods can be both used in practice. The open cementing is suitable in the condition that the difference of the casing lever among the upper parts and the lower parts is small especially in same level. The shaft is always connected with the outside air and the upper and lower shaft always connected in the process of slurry injection. The cement slurry column moves down a long distance during the balancing process and is easily diluted, and the position of the slurry column is difficult to control when the upper casing is quite different from the lower one. However, the required tools are simple. The closed cementing is suitable for any casing matching requirements, especially for the larger casing grade difference. For this method, special sealing tools shall be used to seal the lower casing, the upper and lower wellbore are impassable during cementing, which could avoid the disadvantages of long downward distance of cement slurry column, difficult position control and easy dilution, etc.

收稿日期: 2022-09-16; 修回日期: 2022-11-13 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.02.011

基金项目: 河北省地质矿产勘查开发局项目“河北平原深部基岩热储钻探关键技术研究”(编号 13000022P003294101122)

第一作者: 景龙, 男, 汉族, 1978年生, 钻探工程专业, 主要从事钻探技术及管理, 河北省衡水市红旗大街808号地质大厦, jing_longd@163.com。

引用格式: 景龙, 李兴权, 鲍石磊, 等. 基于压力平衡条件下“戴帽”固井注水泥技术探讨[J]. 钻探工程, 2023, 50(2): 79-84.

JING Long, LI Xingquan, BAO Shilei, et al. Discussion of cement injection technology for “cap” cementation based on balanced pressure condition[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 79-84.

Key words: “cap” cementation; pressure balancing; open cementing; closed cementing; cement injection; geothermal well

0 引言

固井是地热井成井的关键工序,必须重视固井作业的每个环节。固井注水泥就是在套管柱与井壁的环状空间注入水泥浆使之固结封闭的工艺过程^[1],其目的是为了封隔地层、支撑并保护套管。施工中,技术套管较长时,水泥浆全返具有难度,广泛采用“穿鞋戴帽”法固井^[2-5]。在管串底部,井壁与套管的环状间隙内注入一定高度的水泥浆即为“穿鞋”;在管串顶部,井壁与套管的环状间隙内再挤入一定高度的水泥浆即为“戴帽”。在漏失地层,“戴帽”固井难度大,挤入的水泥浆往往偏离设计位置,甚至全部漏入地层,最终导致固井失败^[6-11],有案例说明连续“戴帽”四次最终才获成功^[12]。漏失层“戴帽”固井施工难度主要体现在下列方面:

(1)水泥浆挤注过程中,井内液体(钻井液、水泥浆)不断漏入地层,替浆结束后,水泥浆柱还会移动,最终浆柱是否能够存留在设计段凝固,很难控制。

(2)挤注过程中井内液体容易混入,水泥浆一旦被稀释,将不能形成有效的水泥环,最终导致固井失败。

1 解决“戴帽”固井注水泥失败的思路

1.1 浆液位置控制

漏失层“戴帽”固井注水泥失败往往是因为忽略了压力平衡的问题。压力平衡固井是将井内液柱压力与地层裂隙压力保持平衡,有效控制固井水泥浆柱移动位置的固井方法。

常规固井与压力平衡固井具有较大差异。非漏失层的常规固井可视为静态固井,固井过程中井内不漏失,替浆时将水泥浆顶替至设计位置后,浆柱一般稳定而不动,候凝时间达到设计要求固井即成功。压力平衡固井也可视为动态固井,在向井内注入水泥浆以及替浆过程中会持续漏失,根据现场实测,固井结束后的很长一段时间内,井筒内液面持续下降,可见井内的水泥浆柱一直都在移动^[13],直到含有水泥浆的井筒液柱压力与地层压力实现平衡才会静止并开始凝固。

如图1所示,固井前井筒内静液柱压力与地层

压力平衡,数值一定,如图1通过测 h_0 可以确定,如果进行固井,封固段必然会形成水泥浆柱,其密度大于井筒内原液体密度,平衡后井筒内液面会降低,形成新的液面 h_1 ,根据这种平衡条件控制水泥浆柱位置至关重要,其基本压力平衡条件见式(1)、式(2):

$$\rho_w g h = \rho_w g h_2 + \rho_m g h_m \quad (1)$$

$$h_1 = \left(\frac{\rho_m}{\rho_w} - 1 \right) h_m + h_0 \quad (2)$$

式中: h_0 ——原平衡液面深度,m; h_1 ——新平衡液面深度,m; h_2 ——水泥浆以上水柱高度,m; h_m ——水泥浆柱高度,m; ρ_m ——水泥浆密度,g/cm³; ρ_w ——清水密度,g/cm³。

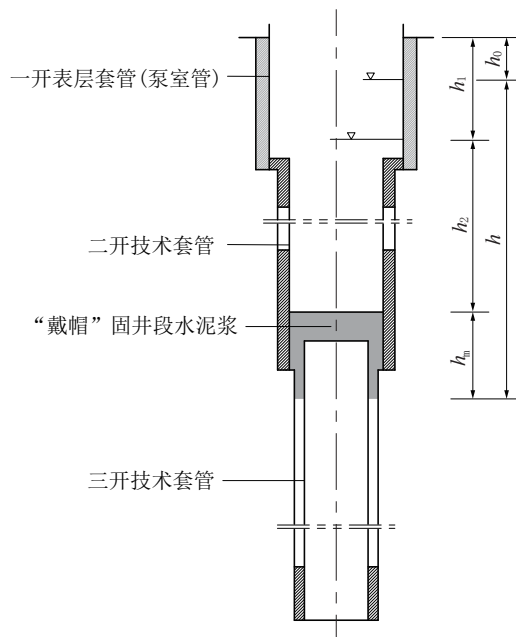


图1 井筒液柱平衡示意

Fig.1 Schematic diagram of wellbore liquid column equilibrium

1.2 浆液稀释控制

避免固井过程中井筒液体对水泥浆的稀释,就要确保水泥浆柱挤入井筒及移动过程中保持整体性。

首先要求水泥浆从注浆钻具底部开始进入井筒到全部进入的过程中,井筒液面必须始终处于上升或静止状态,此时井筒内液体(清水或稀泥浆)不易

混入水泥浆内。因此需要满足的条件见式(3):

$$Q_{\text{排}} \geq Q_{\text{漏}} \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{排}}$ ——固井选择的泵排量,即挤注排量, m^3/h ; $Q_{\text{漏}}$ ——挤注水泥过程中地层的漏失量, m^3/h , 根据固井前井内循环试验确定。

实际施工中泵排量的条件较容易实现。

其次是力求减少水泥浆柱在井筒内的移动距离,避免界面处长时间扰动污染。

基于上述思路,在具体实施中,可以采用开放固井和封闭固井两种方法实现漏失层有效封固。

2 开放固井技术

2.1 基本原理

开放固井是在固井过程中井筒与外界大气始终相通,见图2。在平衡过程中,下部井筒内的液体体积 V_1 进入地层(漏失),该体积即是上部井筒液面下降过程所形成的体积,下部井筒内的水泥浆柱整体以当量体积向下移动一定距离达到平衡后静止而凝固,若移动后的位置正好是拟封固井段,固井便成功。

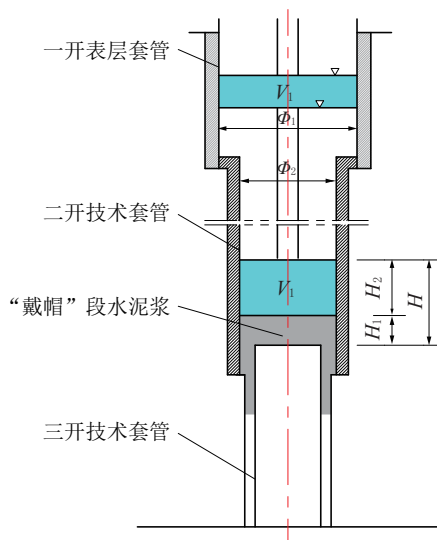


图2 开放固井计算示意

Fig.2 Schematic diagram of open cementing calculation

固井过程中,钻具下入深度是关键数据,其计算方法见式(4)、式(5):

$$H = H_1 + H_2 \quad (4)$$

$$H_2 = (h_1 - h_0) \Phi_1^2 / \Phi_2^2 \quad (5)$$

式中: H ——注浆钻具端口与封固套管顶部的距离,

m ; H_1 ——“戴帽”固井预留水泥塞厚度,一般取 $10 \sim 20 \text{ m}$; H_2 ——压力平衡后井口水位差产生当量体积 (V_1) 使水泥浆柱下移距离, m ; Φ_1 、 Φ_2 ——上部套管和固井处套管内径, mm ; 其它符号意义同上。

开放固井作业注替浆过程中,上部井筒(表层套管)和“戴帽”封固段井筒(技术套管)始终连通,上部井筒内液柱自由升降,最终反映了因注浆形成的新平衡高度。根据式(5)及图2,上部套管内径 Φ_1 较大, V_1 变化会影响 H_2 取值。在实际施工中,由于注浆量误差影响 ($h_1 - h_0$) 小幅变动而使 V_1 变化大,会给 H_2 的取值造成较大影响,使计算偏离实际较大。因此开放固井技术及其钻具下深计算适合应用于上下套管级差较小的情况,尤其适用于同级套管内。

2.2 施工工序

(1) 下入钻具。完成底部“穿鞋”固井后,下入“戴帽”固井钻具(钻杆),下入深度位置依据式(4)计算确定,同时测量井筒内静水位 h_0 。

(2) 循环检验。选择大排量循环,检验循环线路密封性,同时测定井筒内水位变化,为后期注替浆过程控制排量提供参考数据。

(3) 注水泥浆。按照计算体积,连续大排量 ($Q_{\text{排}}$) 注入水泥浆,注浆过程确保井筒液面连续上升或稳定。

(4) 精准替浆。精准计量,以没入静水位 (h_0) 以下的注浆钻具内容积量进行替浆, (排量为 $Q_{\text{排}}$), 替浆结束后井筒内压力逐渐平衡,水位持续下降,最终达到 h_1 。

(5) 起钻候凝。起出钻具,同时监测井口水位变化逐渐接近 h_1 为正常。

(6) 探塞试压。候凝达到 48 h 后探水泥塞,扫开水泥塞进行试压,试压不成功固井质量不合格,分析原因重新封固。

2.3 应用效果

在 KM-01 井施工过程中三开井段漏失严重,实施了三“戴帽”固井注水泥。第一次钻具下入位置计算方法不正确,且水泥浆产生稀释导致失败;第二次注浆排量小,水泥稀释最终失败;第三次基于压力平衡原理,优化计算方法,确定钻具下入深度,采用双泵循环解决水泥浆稀释问题,最终成功^[14]。在此基础上又应用压力平衡原理在雄安新区 D15 井中进行水泥堵漏,获得良好效果。

在河南 PBR01 井施工过程中^[14],二开套管采用

“穿鞋戴帽”固井。在完钻进行抽水试验时发现二开套管顶部与一开套管重叠段存在漏水现象,在套管顶部采用自然沉降法固井失败后,依据压力平衡原理在同级套管内实施固井一次成功,计算确定的稳定液面及钻杆下入位置与实际相近,候凝探孔确定顶部形成12 m完整的水泥塞,经试压证明固井合格。

实践表明,开放固井方法操作简单,无需特殊井下工具。主要缺点是水泥浆与上下井筒内液体连通并接触,套管级差较大时,平衡过程中浆柱下移距离较长,水泥浆容易受到稀释而影响固井质量,有时需要多次固井。

3 封闭固井技术

3.11 基本原理

封闭固井是固井过程中采用特殊井下密封工具使井筒与外界大气始终封闭,见图3,注浆平衡过程中,下部井筒内液体 V_2 会进入地层(漏失),也是固井钻具内液面平衡而下降过程产生的体积,该体积较开放固井体积明显减小,会很快实现平衡。

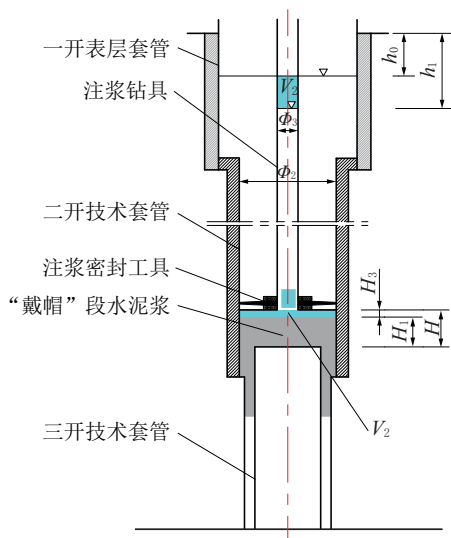


图3 封闭固井计算示意

Fig.3 Schematic diagram of closed cementing calculation

此方法中密封工具下入深度是固井的关键参数,其计算见式(6)、式(7):

$$H=H_1+H_3 \quad (6)$$

$$H_3=(h_1-h_0)\Phi_3^2/\Phi_2^2 \quad (7)$$

式中: H_3 ——压力平衡后钻具内水位差产生当量体

积使水泥浆柱下移距离,m; Φ_3 ——为注浆钻具内径,mm;其它符号意义同上。

封闭固井作业注浆过程中,上部井筒和“戴帽”封固段井筒始终是不通的,上部井筒水位不会变动。对比式(5)和式(7),泵室管内径 Φ_1 远大于钻具内径 Φ_3 ,相同条件下 H_3 远小于 H_2 。在实际施工中,由于注浆量的误差影响(h_1-h_0)小幅变动而使 V_2 变化小,对 H_3 的取值影响较小,使计算偏离实际差值较小。因此封闭固井技术不受套管级差的影响,适合各种套管级配条件下固井注水泥作业,在上下套管级差较大时更显其精确封固优势。

3.2 施工工序

(1)下入密封工具。完成底部“穿鞋”固井后,开始“戴帽”,将钻杆连接密封工具送入到位并座封,下入深度位置依据式(6)计算确定,测量井筒内水位 h_0 。

(2)循环检验。开泵循环清水,监测井筒内水位,如果水位变化则说明密封失效,应重新密封再次循环检验。

(3)注水泥浆。按照设计体积,确保连续注入水泥浆,挤注过程中持续监测井筒内水位变化,水位稳定为正常。

(4)精准替浆。精确计量,以没入静水位(h_0)以下的注浆钻具内容积量进行替浆。

(5)候凝。替浆完成,卸开井口钻具候凝,监测钻具内外水位变化,钻具内水位最终下降至 h_1 后稳定,钻具外水位 h_0 静止无变化为正常。

(6)起钻。候凝8 h后打开封隔器,起钻再候凝,候凝期间水位稳定无变化为正常。

(7)探塞试压。累计候凝达到48 h探水泥塞,扫开水泥塞进行试压,试压不成功固井质量不合格,分析原因重新封固。

3.3 应用效果

衡水市中心城区JK01地热井成井深度3002 m,揭露三组(寒武—奥陶系、蓟县系、长城系)基岩热储,其最终成井结构见图4。三开 $\Phi 216$ mm井径钻进至蓟县系后,钻井液失返,顶漏钻进至2338 m完钻,下入 $\Phi 177.8$ mm技术套管,后期采用分层射孔成井。因上部寒武—奥陶系热储较薄,为保证热储利用,避免固井水泥浆堵塞裂隙,设计“戴帽”固井时只进行重叠管处封固。

根据以往开放固井施工经验,漏失量较大的基

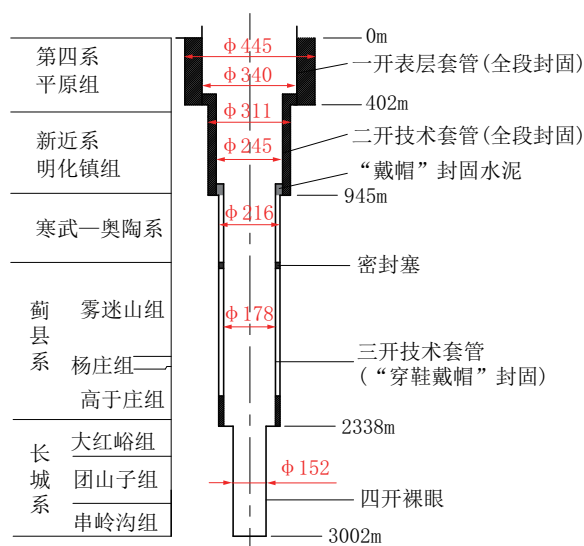


图4 JK01地热井井成结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of geothermal well (JK01) formation structure

岩层,封固段水泥浆柱平衡过程中运移距离长,稀释现象严重,可能多次固井,耗时较长,且浆液容易进入热储堵塞裂隙。为保护热储,且提高工作效率,确保“戴帽”质量,试验性地采用石油钻井常用的封隔器辅助固井。采用封隔器型号 Y221-21,其为单向卡瓦支撑,主要由水力锚、中心管、胶筒、锥体、支撑卡瓦、摩擦转向器等组成,其实物见图5。工具总长1.6 m,钢体最大外径210 mm,最小通径90 mm,最大工作压差35 MPa,座封压力100 kN,耐温120℃。使用时,钻杆连接封隔器下入到设计位置,上提钻具后正转,再下放压缩座封,实现密封,解封时上提钻具即可解封提出。注替浆过程中封隔器以上的井筒内液体不与水泥浆接触,浆柱不易受污染。



图5 封隔器实物

Fig.5 Physical picture of packer

固井前测得静水位(h_0)57 m,设计注入水泥浆1.2 m³,密度控制为1.75 g/m³以上,Ø177.8 mm管顶部重叠位置为908~945 m,重叠管长37 m,设计水泥塞顶面位置为898 m(设计水泥塞厚度10 m)。根

据式(6)、式(7), H_1 取值10 m, H_3 计算值为8 m,计算封隔器下入位置890 m左右,距套管口(H)18 m,依据式(2)计算重新建立平衡后的水位(h_1)为92 m,固井结束后实测注浆钻杆内水位95 m,接近计算数值,后期水位又有小幅上升,8 h后水位稳定,解封提出钻具。待候凝48 h后探得水泥塞位置为904 m,由此得到水泥塞实际厚度仅4 m(水泥浆凝固成水泥石的过程中,浆液表面产生一段离析,属于正常),为确保固井质量,建议设计水泥塞厚度宜为20 m左右。

后期进行固井质量检验:扫开水泥塞试压4 MPa,稳定时间30 min不降,表明固井合格;又通过声幅测井确认固井可靠;在抽水试验中重叠段密封良好,无串水现象,再次证明封固有效。

实践表明,该固井方法需要特殊的井下密封工具封闭井筒,隔绝上部井筒与固井井筒的压力联系,使其成为上下不连通的两个部分,平衡过程中水泥浆柱不受上部井筒液体的影响,下移距离较短,浆柱位置控制更加精准,且不易稀释,使小体积量的水泥浆固结更可靠。

4 结语

(1)漏失地层“戴帽”固井使用水泥浆量虽然较少,但基于压力平衡原理指导施工是可以实现有效封固的。

(2)开放固井在注替浆过程中,水泥浆与上部井筒内液体连通,级差较大的套管内固井,平衡过程中水泥浆柱下移距离较长,易被稀释,且位置不易控制,会影响固井质量。但该方法所需工具简单,适合应用于套管级差较小的条件,尤其是在同级套管内。

(3)封闭固井在注替浆过程中,隔绝上部井筒与固井井筒的压力联系,水泥浆柱在平衡过程中不受上部井筒液体的影响,下移距离较短,小体积量的浆柱不易稀释、位置易控制,质量更可靠。该方法需要特殊的井下密封工具,适合各种套管级配条件下固井注水泥作业,在上下套管级差较大时更显其精确封固优势。

参考文献(References):

[1] DZ/T 0260—2014, 地热钻探技术规程[S].

DZ/T 0260—2014, Technical specification for geothermal well drilling[S].

- [2] 伍晓龙,杜焱森,王庆晓.冀中坳陷区域JZ04井钻井工程设计[J].钻探工程,2021,48(7):84-90.
WU Xiaolong, DU Yaosen, WANG Qingxiao. Drilling design of Well JZ04 in the Jizhong depression region[J]. Drilling Engineering, 2021,48(7):84-90.
- [3] 孟祥瑞,谢永德,祁新堂,等.平顶山北地热示范区PBR01井钻探技术研究与分析[J].钻探工程,2021,48(S1):264-268.
MENG Xiangrui, XIE Yongde, QI Xintang, et al. Drilling technology for PBR01 geothermal well in North Pingdingshan Geothermal Demonstration Zone[J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):264-268.
- [4] 潘德元,何计彬,杨涛,等.雄安牛驼镇地热田岩溶热储层地热深井井身结构优化设计[J].钻探工程,2021,48(2):78-84.
PAN Deyuan, HE Jibin, YANG Tao, et al. Optimization design of the geothermal wellbore structure in karst reservoir[J]. Drilling Engineering, 2021,48(2):78-84.
- [5] 俱养社,张玉贵.韩城地区中深层钻井取热供暖关键技术[J].钻探工程,2021,48(12):79-85.
JU Yangshe, ZHANG Yugui. Key technology for middeep drilling geothermal heat extraction in the Hancheng area[J]. Drilling Engineering, 2021,48(12):79-85.
- [6] 胡晋军,和国磊,耿志山,等.天津CGSD01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 technology for Tianjin CGSD01 geothermal survey well [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(1):26-30.
- [7] 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.
QIAN Hongqiang, WANG Juan, SUN Yudong, et al. Analysis of leakage formation and selection of leaking stoppage methods in geothermal well drilling in Tianjin area[J]. Geological Survey and Research, 2016,39(3):226-230.
- [8] 吕利强.雄安新区地热井钻探施工难点及措施[J].中国煤炭地质,2019,31(10):69-72.
Lǚ Liqiang. Difficulty and measures of geothermal well drilling in Xiong'an New Area [J]. Journal of China Coal Geology, 2019,31(10):69-72.
- [9] 刘文武,刘家荣,郭坤,等.雄安新区D14地热井钻探施工技术研究[J].西部探矿工程,2019,31(8):102-106.
LIU Wenwu, LIU Jiarong, GUO Kun, et al. Research on drilling and construction technology of D14 geothermal well in Xiong'an New Area [J]. West-China Exploration Engineering, 2019,31(8):102-106.
- [10] 高鹏举,董向宇,马峰,等.雄安新区D15地热勘探井钻探施工技术[J].钻探工程,2021,48(3):106-112.
GAO Pengju, DONG Xiangyu, MA Feng, et al. Drilling technology for D15 geothermal exploration well in Xiong'an New Area [J]. Drilling Engineering, 2021,48(3):106-112.
- [11] 易亚东,余中岳,高兴宝.下套管失返性漏失正注反挤置换法工艺技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(5):27-31.
YI Yadong, YU Zhongyue, GAO Xingbao. Normal injection and reverse squeeze displacement process for lost return leakage in RIH of casing [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(5):27-31.
- [12] 樊腊生,贾小丰,王贵玲,等.雄安新区D03地热勘探井钻探施工实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(10):13-22.
FAN Lasheng, JIA Xiaofeng, WANG Guiling, et al. Drilling practice of D03 geothermal exploration well in Xiong'an New Area [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(10):13-22.
- [13] 李砚智,张长茂,张平.漏失量较大地层“戴帽”固井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(7):41-44,50.
LI Yanzhi, ZHANG Changmao, ZHANG Ping. Top fill cementing technology for large loss formation [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(10):13-22.
- [14] 祁新堂,谢永德,郭佳欢,等.平顶山北地热示范区PBR01井钻探施工实践[J].钻探工程,2021,48(S1):275-280.
QI Xintang, XIE Yongde, GUO Jiahuan, et al. Drilling of Well PBR01 in the North Pingdingshan Geothermal Demonstration Area [J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):275-280.

(编辑 王文)