

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.01.07

封隔注浆分层成井技术在水文地质勘查中的应用研究

王明明^{1,2}, 解 伟^{1,2}, 安永会², 龚 磊², 王文祥², 崔虎群²

(1. 国土资源部地质环境监测技术重点实验室, 河北 保定 071051;

2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

摘要: 封隔注浆分层成井技术为多层水文地质钻孔分层成井提供了一种快速高效的新工艺。传统分层成井方法耗时长、效果差、止水效果不稳定, 尤其是在细颗粒或钻孔结构不稳定的地层分层成井困难, 易发生钻孔事故等问题。文章通过室内试验和野外施工, 探索出封隔注浆分层成井。以 HQ56 水文地质孔为例, 研究了分层成井、分段振荡洗井, 并进行了分层抽水试验。研究表明, 封隔注浆分层成井技术止水可靠, 分层抽水试验数据准确。该技术尤其适用于细颗粒或钻孔结构不稳定地层快速分层成井。

关键词: 封隔注浆分层成井; 封隔器; 水文地质孔; 分层抽水试验; 水文地质勘查

中图分类号: P641.73; P634.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)01-0050-06

Application of the technology of injecting cement for the stratified well completion to hydrogeological exploration

WANG Mingming^{1,2}, XIE Wei^{1,2}, AN Yonghui², GONG Lei², WANG Wenxiang², CUI Huqun²

(1. Key Laboratory for Geological Environmental Monitoring Technology of the Ministry of Land and Resources, Baoding, Hebei 071051, China; 2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding, Hebei 071051, China)

Abstract: The technology of injecting cement for the stratified well completion can provide a new rapid and high effective technology for the stratified well completion on a multi-layer hydrogeologic well. The problems of time-consuming, bad effect, unstable effect of sealing water, difficult construction and high failure rate of the stratified well completion for the stratum of fine grained or unstable drilling structure resulting from traditional methods of the stratified well completion are considered, and the technology of injecting cement for the stratified well completion is developed through laboratory tests and drilling construction. On the basis of the expounding principle and the process of the technology of injecting cement for the stratified well completion, the application example of the HQ56 hydrogeologic well from the stratified well completion, segment well-flushing and stratified pumping test of the hydrogeologic well is analyzed. The results show that application of the technology of injecting cement for the stratified well completion to seal water is reliable and the data from the stratified pumping test is accurate. The technology is especially suitable for the rapid stratified well completion on the stratum of fine grained or unstable drilling structure.

Keywords: injecting cement for the stratified well completion; packer; hydrogeologic well; stratified pumping test; hydrogeological survey

作为水文地质调查重要的技术手段, 分层水文地质孔能够通过分层抽水试验了解不同深度含水层组的

水文地质特征, 实现目的含水层的单独研究, 为正确评价地下水资源提供科学依据^[1]。

收稿日期: 2018-05-15; 修订日期: 2018-07-08

基金项目: 中国地质调查项目(121201012000150004)

第一作者: 王明明(1990-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事水文地质环境地质钻探技术与开发工作。E-mail: wmmcugb@126.com

传统的分层水文地质孔成井方法主要为海带止水、膨胀橡胶止水和黏土球止水。海带和膨胀橡胶止水均属于临时性止水,具有一定的止水效果,但成本高,工序繁杂,承压性差,止水效果不稳定,不适用于永久性止水。黏土球止水是水文地质孔分层成井最常用的方法,成本低,止水效果好,但在细颗粒地层或钻探结构不稳定地层进行分层成井极易出现钻孔事故,影响分层成井质量,同时,黏土球水化时间短,也不适用于大深度水文地质孔分层成井^[2-6]。因此,亟需开发一种新型分层成井技术实现水文地质孔高效快速分层成井。

在介绍封隔注浆分层成井技术原理和工艺流程的基础上,本文进行了大量关于水泥浆性能的测试试验,将封隔注浆分层成井技术应用于黑河流域 HQ56 水文地质孔分层成井,并对比分析了分层抽水试验获得的水文地质参数结果,提出了封隔注浆分层成井技术的优势及使用推广价值。

1 技术原理

1.1 成井原理

近年来,随着油田的不断勘探开发,油气开采向着低压低渗地层、深层、薄层等方向发展,为封隔不同的层位,进行有效的压裂和分层开采等作业,地层封隔注水泥技术与工艺应运而生,已在国内多个油田中使用,技术比较成熟^[7-9]。

在借鉴油气开采领域地层封隔注水泥技术与工艺的基础上,结合中国地质调查局水文地质环境地质调查中心自主研发的封隔设备(专利号:201721742572.2),提出了封隔注浆分层成井技术,其原理(图 1)是在钻进、下管、全孔填砾和洗井工艺结束后,通过注浆导管向井管内下入封隔器具,在注浆管与注浆窗口对齐后,在止水位置启封双封隔器,将注浆窗口隔离,使用泥浆泵将水泥浆通过注浆管注入止水段环状间隙实现止水。

封隔注浆分层成井技术属于原创性技术,具有施工成本低,工作效率高、止水可靠等优势,适用于细颗粒地层或钻孔结构不稳定地层管井快速分层成井。

1.2 工艺流程

封隔注浆分层止水是封隔注浆分层成井工艺的关键工艺,其施工流程见图 2,其核心工艺主要为:检测注浆窗口位置、封隔注水和管内注水保压。

1.3 设备

封隔注浆分层成井技术主要设备为封隔器、泥浆搅拌机和泥浆泵等,其中核心设备为自主研发的 K344

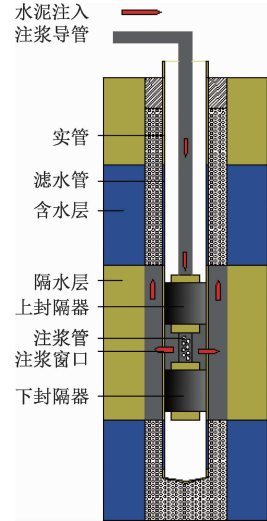


图 1 封隔注浆分层成井技术原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the technology of injecting cement for the stratified well completion

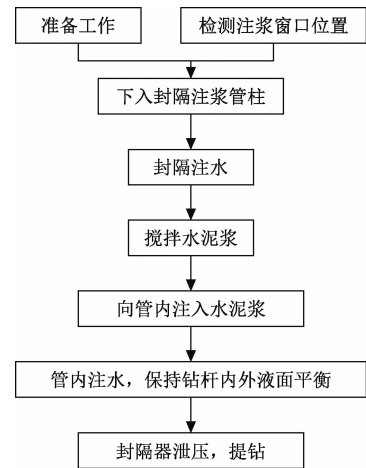


图 2 封隔注浆分层止水施工流程

Fig. 2 Construction process of injecting cement to seal water

扩张式封隔器,由短节、上接头、中心管、胶筒及浮动头组成,使用高压氮气(或惰性气体)作为启封介质,通过高压气管线连接至地表供压设备,具有膨胀比大、有效膨胀作用段长、封隔时间长等优点,适用于松散地层管井和基岩地层裸孔封隔。

1.4 优势

一般情况下,海带止水和膨胀橡胶止水仅作为临时性止水材料,文中不再讨论。相比于黏土球止水,封隔注浆分层成井技术具有以下优势。

(1) 可大幅降低钻孔分层成井事故率

黏土球止水成井工艺为钻进→下管→分层填砾和止水→洗井,其关键工艺为“分层填砾和止水”,而该工艺也是分层成井过程中事故发生率最高的阶段,极

易发生孔内坍塌、测量回填位置不准确或无法测量砾料回填高度、砾料回填高度超过止水位置和钻孔缩颈引起的黏土球“架桥”等事故,以上事故在细颗粒地层或钻孔结构不稳定地层发生率更高,对钻孔成井质量影响较大。

封隔注浆分层成井技术改变了传统水文地质孔分层成井工艺流程,将成井工艺改为钻进→下管→全孔填砾→洗井→封隔注浆分层止水,突破性地去除了“分层填砾和止水”这一钻孔事故高发阶段,同时,该技术是在下管、钻孔填砾和洗井等工艺结束后实施,使得分层成井更加简单安全,大幅降低钻孔分层成井事故率。

(2) 测量结果准确

黏土球止水使用测绳测量砾料或黏土球回填高度,存在测量不到回填高度或测量结果不准确问题,会对分层成井质量产生较大影响。

封隔注浆分层成井技术仅需注浆前检查注浆窗口与注浆管是否对应,可通过物探测井、丈量井管与注浆导管确定,测量结果非常准确。

(3) 施工效率高

正常情况下,黏土球止水单层施工时间在 16 h 以上(仅指滤料和黏土球回填工序),受钻孔深度、砾料投放速度、测量滤料回填位置和钻孔事故等因素影响,而且影响较大,甚至时间可能长达 15~30 d。

封隔注浆分层成井技术则不受其他因素影响,单层施工时间约 3~5 h(包括下入注浆钻具、搅拌水泥浆、注浆和提钻等工序),安全高效。

(4) 适用于深孔分层成井

对于孔壁较为稳定地层,采用黏土球分层成井最大深度为 300 m,而在细颗粒或钻孔结构不稳定地层,由于极易出现孔内坍塌、缩颈和无法测量滤料回填高度等问题,最大止水深度非常不稳定,可能仅有几十米。

封隔注浆分层成井技术是在全孔填砾后管内分层成井,不受地层影响,其最大分层成井深度取决于封隔器性能,安全高效,可轻松实现深部钻孔分层成井。

2 水泥浆初凝时间测定试验

封隔注浆分层成井技术属于原创性技术,可借鉴的前人经验较少,需要进行试验获得数据支撑封隔注浆分层成井技术应用。

试验目的:(1)通过试验了解水泥浆初凝时间,及时对封隔器卸荷,提出钻具,防止钻具被凝固在井内引

发钻孔事故,同时,尽可能延长封隔时间,使注入水泥浆尽可能进入地层,减少掉入孔内水泥浆量,实现绿色钻探;(2)通过试验获得水灰比、水泥添加剂、搅拌时间最优配比,为封隔注浆分层成井技术实际应用提供理论支撑。

此次试验从水灰比、水泥添加剂、水泥种类和搅拌时间 4 个方面优选。

(1) 水灰比

采用就地取材,从施工地附近采购,同时,为保证水泥流体性能和强度,水灰比设置为 0.5、0.55 和 0.6。

(2) 添加剂

主要作用为防止水泥凝固后收缩,根据前期试验经验,当添加剂含量超过 5% 时,搅拌和抽送水泥浆比较困难,因此,添加剂用量设置为 2%、3% 和 4%。

(3) 搅拌机

采用 JJ-1 精密定时电动搅拌器,功率 100 W,调速范围 100~2 500 r/min,根据钻机使用的泥浆搅拌机性能,将搅拌转速设为 600 r/min。

(4) 维卡仪

测试水泥浆初凝时间。水泥浆初凝时间测定试验采用四因素三水平表,见表 1。

表 1 水泥浆试验因素水平表

Table 1 Factor levels of the cement slurry test

水平	因素			
	水灰比 A	添加剂用量 B	水泥种类 C	搅拌时间 D/min
1	0.50	2%	425#“戈壁”	20
2	0.55	3%	525#“戈壁”	25
3	0.60	4%	425#“嘉峪关”	30

根据表 1 制定水泥浆初凝时间测定试验方案,试验方案及结果见表 2。

表 2 正交试验方案及结果

Table 2 Schemes and results of the orthogonal test

试验号	试验条件				初凝时间 /min
	水灰比 A	添加剂用量 B	水泥种类 C	搅拌时间 D/min	
1	0.50	2%	425#“戈壁”	20	175
2	0.50	3%	525#“戈壁”	25	125
3	0.50	4%	425#“嘉峪关”	30	120
4	0.55	2%	525#“戈壁”	30	145
5	0.55	3%	425#“嘉峪关”	20	210
6	0.55	4%	425#“戈壁”	25	175
7	0.60	2%	425#“嘉峪关”	25	150
8	0.60	3%	425#“戈壁”	30	200
9	0.60	4%	525#“戈壁”	20	160

采用极差分析法对正交试验结果进行计算和分析,首先需要计算 K_{jm} 、 k_{jm} 和 R_j ,再判断因素主次、优水平和优组合。

K_{jm} 为第 j 列因素 m 水平所对应的试验指标和, k_{jm} 为 K_{jm} 平均值,由 k_{jm} 大小可以判断第 j 列因素优水平和优组合。 R_j 为第 j 列因素的极差,反映了第 j 列因素水平波动时,试验指标的变动幅度。 R_j 越大,说明该因素对试验指标的影响越大。根据 R_j 大小,可以判断因素的主次顺序。正交试验结果分析见表 3。

表 3 正交试验结果分析
Table 3 Analysis of orthogonal test

试验结果分析	试验条件			
	水灰比 A	添加剂用量 B	水泥种类 C	搅拌时间 D/min
K_1	420	470	550	545
K_2	535	535	430	450
K_3	510	455	480	465
k_1	140	156.7	183.3	181.7
k_2	178.3	178.3	143.3	150
k_3	170	151.7	160	155
极差 R	38.3	26.6	40	31.7
主次顺序	C > A > D > B			
优水平	A ₂	B ₂	C ₁	D ₁

根据表 3 正交试验结果分析,可知极差 $R_C > R_A > R_D > R_B$,因此,对水泥初凝时间影响的主次顺序依次为主一次:CADB,同时,根据 k_{jm} 计算数据分析,A₂、B₂、C₁、D₁ 分别为 A、B、C、D 因素的优水平,因此,最优方案为:C₁A₂D₁B₂,即 425“戈壁”水泥,水灰比 0.55,搅拌时间 20 min,水泥添加剂用量 3%。

采用该最优配方搅拌的水泥浆,初凝时间达到 3.5 h,为封隔注浆分层成井技术野外应用提供了参考依据。

3 应用实例

3.1 工作背景

本次研究区位于酒泉金塔盆地,区域地层颗粒较细,表现为亚砂土、黏土、中粗砂、细沙、砂砾石互层,地下水类型为潜水和承压水,含水层为多层结构^[10-12]。

在前期实施分层水文地质质孔过程中,孔内坍塌、测量回填位置不准确或无法测量砾料回填高度、砾料回填高度超过止水位置和钻孔缩颈引起的黏土球“架桥”等事故发生非常多。考虑到项目后期工作区主要为细颗粒地层,孔壁不稳定,分层成井过程中同样会出现以上孔内事故,不适合采用传统分层成井方法实施分层水文地质孔。

通过不断调研和改进,结合已有的封隔器等相关产品,将封隔注浆分层成井技术应用至 HQ56 水文地质孔分层成井。

3.2 HQ56 钻孔概况

以 HQ56 钻孔为例,该钻孔位于酒泉市金塔县三合乡榆树沟村,岩性以砂砾石、粗砂、粉细砂和粉质黏土为主,成井深度设计为 274.5 m,要求揭穿第四系地层,钻孔分为 3 层,止水位置分别设计为 115.2 ~ 128.2 m 和 192.2 ~ 205.2 m。考虑到该钻孔地层颗粒较细,止水层数多,止水位置深,因此,采用封隔注浆分层成井技术实施分层成井,图 3 为 HQ56 钻孔成井结构。

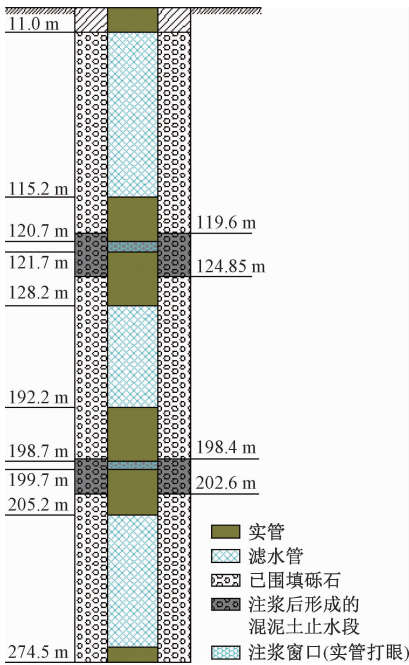


图 3 HQ56 钻孔成井结构示意图
Fig. 3 Diagram showing the structure of well HQ56

根据图 3 可知,HQ56 钻孔实际止水位置为 119.6 ~ 124.85 m 和 198.4 ~ 202.6 m,长度分别为 5.25 m 和 4.2 m,比设计注浆量(6 m)略少,但完全可以满足成井止水要求。

同时,根据成井结束后物探测井结果,发现与注浆窗口位置相比,实际止水段位置靠下端,可见水泥浆运移位置主要是朝下,并不是均匀分布,该水泥浆运移规律的发现可指导注浆窗口位置选择,尤其适用于止水厚度较薄地层分层成井。

3.3 分层抽水试验

在钻孔分层成井结束后,利用潜水泵型双封隔器分层抽水系统实施了同径封隔分层抽水试验,图 4 为上、中、下三层抽水试验设备连接示意图。

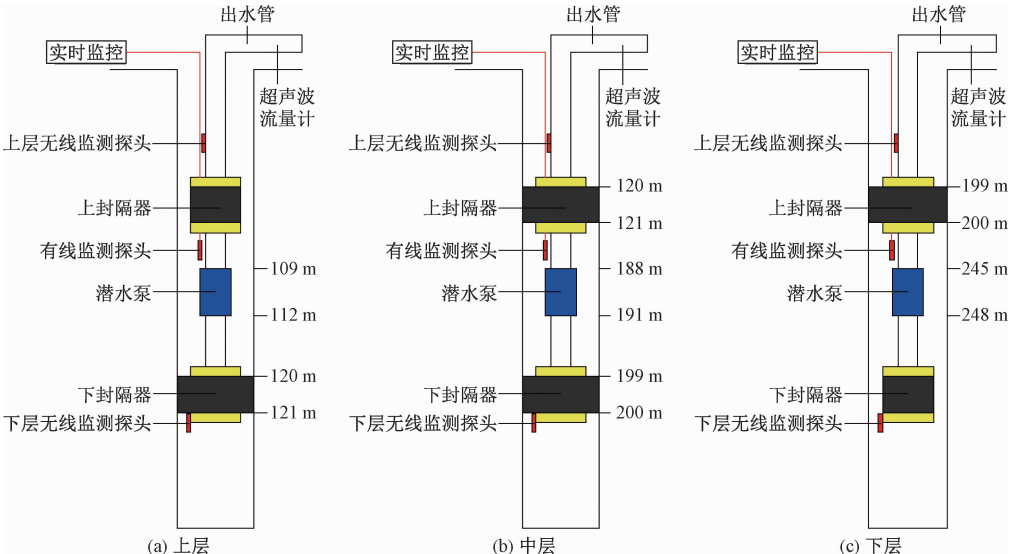


图 4 分层抽水试验设备连接示意图

Fig. 4 Sketch diagram showing the connecting equipment for stratified pumping test connection

3.4 数据分析

根据水文地质规范要求并结合钻孔富水性实际情况,对 HQ56 水文地质孔进行上、中、下三层抽水试验,

每层自小流量到大流量进行 3 个落程,流量大小通过变频控制柜来调节。获得的抽水试验数据和采集水样分析见表 4 和表 5。

表 4 HQ56 钻孔分层抽水试验数据

Table 4 Data of the stratified pumping test of well HQ56

HQ56	小流量			中流量			大流量		
	降深 S/m	流量 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	单位涌水量 $q/(L \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$	降深/ $(s \cdot m^{-1})$	流量 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	单位涌水量 $q/(L \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$	降深/ $(s \cdot m^{-1})$	流量 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	单位涌水量 $q/(L \cdot s^{-1} \cdot m^{-1})$
上层	0.88	66.72	21.06	1.89	133.73	19.65	3.92	201.14	14.25
中层	5.52	55.13	2.77	11.55	109.54	2.63	17.48	164.34	2.61
下层	5.57	53.28	2.66	12.19	106.24	2.33	17.98	159.85	2.47
混合	0.89	60.23	18.80	1.84	119.51	18.04	3.44	181.37	14.64

表 5 HQ56 钻孔各层离子浓度和 TDS

Table 5 Total dissolved solids and ionic concentrations of different aquifers toxpped by well of HQ56 $/(mg \cdot L^{-1})$

编号	水质类型	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	NO_3^{-}	TDS
上层	$SO_4 \cdot HCO_3 - Mg$	73.0	98.4	77.8	8.5	14.4	263.6	70.2	391.0	13.21	752.4
中层	$HCO_3 \cdot SO_4 - Mg \cdot Ca$	36.5	42.6	23.8	6.6	14.4	172.8	20.6	115.8	1.57	330.6
下层	$HCO_3 \cdot SO_4 - Mg$	34.6	50.2	41.5	9.3	12.0	192.8	27.7	147.0	4.75	384.1

根据表 4,HQ56 钻孔上部含水层富水性极强,远高于中下部含水层,中部含水层富水性略高于下部含水层。

根据表 5,HQ56 钻孔上部含水层 TDS 最高,达到 752.4 mg/L,中部含水层 TDS 最低,为 330.6 mg/L,下部含水层 TDS 高于中部含水层,为 384.1 mg/L。

通过对表 4 和表 5 中 HQ56 钻孔的单位涌水量和 TDS 进行对比分析,发现获得的各含水层水文地质参数及水质类型存在一定差别,从侧面反映出采用封隔注浆分层成井技术进行分层成井安全可靠,止水效果

良好。

4 结论

(1)封隔注浆分层成井技术改变了传统水文地质孔分层成井工艺流程,去除了“分层填砾和止水”这一钻孔事故高发阶段,有效降低了钻孔分层成井事故发生率,并且将分层成井时间缩短为 3~5 h,提高了分层成井深度,使得水文地质孔分层成井简单、高效和便捷,对于细颗粒地层或钻孔结构不稳定地层快速分层成井具有极高的借鉴应用价值。

(2)采用封隔注浆分层成井技术进行分层成井时,发现实际止水段并非在注浆窗口位置两侧均匀分布,而是比注浆窗口位置靠下,该水泥浆运移规律地发现可指导注浆窗口位置选择,对于止水厚度较薄地层分层成井更具有指导意义。

(3)通过对比分析 HQ56 钻孔分层抽水试验及水质化验相关数据,发现各含水层水文地质参数及水质类型存在一定差别,说明采用封隔注浆分层成井技术进行水文地质孔分层成井,止水效果是非常可靠的,值得在水文地质调查工作中推广。

参考文献:

- [1] 中国地质调查局. 水文地质手册[M]. 2 版. 北京: 地质出版社, 2012. [China Geological Survey. Handbook of hydrogeology [M]. 2nd ed. Beijing: Geologic Press, 2012. (in Chinese)]
- [2] 常林祯, 杨文轩, 徐树, 等. 分层止水技术在污染场地环境调查中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(7): 24-28. [CHANG L Z, YANG W X, XU S, et al. Application of stratified water shut-off technology in environmental investigation of contaminated sites [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(7): 24-28. (in Chinese)]
- [3] 王明明, 卢颖, 解伟. CMT 监测井在黑河流域地下水监测中的应用[J]. 中国环境监测, 2016, 32(6): 141-145. [WANG M M, LU Y, XIE W. Application of CMT monitoring well on monitoring groundwater in Heihe River Basin [J]. Environment Monitoring of China, 2016, 32(6): 141-145. (in Chinese)]
- [4] 郑继天, 王建增, 蔡五田, 等. 地下水污染调查多级监测井建造及取样技术[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(3): 128-131. [ZHENG J T, WANG J Z, CAI W T, et al. Construction of multi-level monitoring well and sampling technology for groundwater contamination investigation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(3): 128-131. (in Chinese)]
- [5] 何计彬, 潘德元, 李炳平, 等. 深井分层真空抽水试验及机理分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(1): 18-23. [HE J B, PAN D Y, LI B P, et al. Deep well stratified vacuum pumping test and the mechanism analysis [J]. Exploration Engineering (Rock & Drilling and Tunneling), 2017, 44(1): 18-23. (in Chinese)]
- [6] 王晓燕, 安永会, 邵新民, 等. 封隔震荡洗井新技术在水文地质勘查中的应用研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 30-33. [WANG X Y, AN Y H, SHAO X M, et al. Application of the new technology of well-flushing with packer to hydrogeological exploration [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(4): 30-33. (in Chinese)]
- [7] 秦金立, 陈作, 杨同玉, 等. 鄂尔多斯盆地水平井多级滑套分段压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(1): 7-12. [QIN J L, CHEN Z, YANG T Y, et al. Technology of staged fracturing with multi-stage sleeves for horizontal wells in the Ordos Basin [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(1): 7-12. (in Chinese)]
- [8] 付亚荣. 分层采油多级封隔器坐封模型[J]. 石油机械, 2016, 44(10): 90-92. [FU Y R. Setting model of multiple packer for separate layer production [J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(10): 90-92. (in Chinese)]
- [9] 王治国, 王在强, 巨亚锋. K344-108 型小直径封隔器的改进与应用[J]. 石油机械, 2010, 38(8): 40-43. [WANG Z G, WANG Z Q, JU Y F. Improvement and application of model K344-108 small-diameter packer [J]. China Petroleum Machinery, 2010, 38(8): 40-43. (in Chinese)]
- [10] 李文鹏, 安永会. 黑河流域重点地区水文地质调查成果报告[R]. 保定: 中国地质调查局水文地质工程地质调查中心, 2016. [LI W P, AN Y H. Results report on hydrogeological investigation of Heihe River Basin [R]. Baoding: Center for Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, 2016. (in Chinese)]
- [11] 赵捷, 徐宗学, 左德鹏. 黑河上中游潜在蒸散发模拟及变化特征分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(5): 614-623. [ZHAO J, XU Z X, ZUO D P. Estimation of potential evapotranspiration and its variability in the upper and middle reaches of the Heihe River basin [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(5): 614-623. (in Chinese)]
- [12] 卢颖, 郭建强. 基于多元统计方法的张掖盆地地下水化学特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(5): 129-134. [LU Y, GUO J Q. Hydrochemical characteristics of groundwater of Zhangye basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(5): 129-134. (in Chinese)]

编辑: 张若琳