

新型同径分层止水工艺在地热探采深井的应用

杨联锋¹, 段云星^{*2}

(1. 山西省第三地质工程勘察院, 山西 晋中 030620; 2. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要:原平大营地热探采结合深井完钻井深3088 m, 为探明494~3088 m变质岩地层的水文地质参数和水源补给情况, 基于岩心和测井资料划分4个抽水试验段, 且试验后需要恢复目的含水层。根据“一孔同径分层止水”原则, 设计了管内止水托盘止水、管外止水伞止水的新型同径分层止水工艺。该工艺简化了井身结构, 避免了管外投粘土球、注水泥等堵塞含水层的情况。现场实施表明, 该工艺止水效果完全满足水文地质抽水试验要求, 可为同类工程提供经验和借鉴。

关键词:地热探采井; 同径止水; 分层抽水; 止水伞; 止水托盘

中图分类号: P634.8; TE249 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2021)08-0033-07

Application of new single diameter multi-level water sealing technology in geothermal exploration and production wells

YANG Lianfeng¹, DUAN Yunxing^{*2}

(1. Shanxi Third Geological Engineering Investigation Institute, Jinzhong Shanxi 030620, China;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The well designed for geothermal exploration and production in Daying, Yuanping was completed at depth of 3088m. To find out hydrogeological parameters and water recharge of 494~3088m formation, it was divided with four pumping test sections based on core and logging data; meanwhile, the target aquifer needed to be restored as much as possible after tests. According to the principle of “multi-level sealing in a single diameter hole”, a new water sealing process was designed with the water-stop tray for inside-pipe sealing and the canvas umbrella for outside-pipe sealing. This process simplifies the well structure and avoids clogging caused by dropping clay balls, injecting cement, etc. from outside the pipe. Field use shows that this process meets the water-sealing requirements of hydrogeological pumping tests, and can provide reference for similar projects.

Key words: geothermal exploration and production wells; single diameter water sealing; multi-level pumping; canvas umbrella; water sealing tray

0 引言

抽水试验是获取区域水文地质参数、地层温度、地下水补给路径、影响范围等项目的重要手段^[1-4]。工程技术人员在抽水试验的抽水设备、止水技术、止水材料、计算方法等方面积累了大量经验

和方法^[5-6]。管外止水和管内止水是否有效决定着试验结果的准确性。目前的抽水试验止水方式有异径分台阶止水工艺和一孔同径分层止水工艺^[7-18]。异径分台阶止水工艺所需多级扩孔, 井身结构复杂, 需多次下入、拔出井管, 成本较高; 一孔

收稿日期: 2020-10-23; 修回日期: 2021-03-02 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.08.005

作者简介: 杨联锋, 男, 汉族, 1968年生, 副院长, 高级工程师, 探矿工程专业, 主要从事水文水井钻探、地热井钻探、旋挖钻孔工艺的技术研究与管理工作, 山西省晋中市榆次区大学街三勘院, sxjlylf@sohu.com。

通信作者: 段云星, 男, 汉族, 1992年生, 地质工程专业, 博士研究生在读, 主要研究方向为钻探工程技术、地热资源开发与利用, 北京市海淀区学院路29号, tansund@foxmail.com。

引用格式: 杨联锋, 段云星. 新型同径分层止水工艺在地热探采深井的应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(8): 33-39.

YANG Lianfeng, DUAN Yunxing. Application of new single diameter multi-level water sealing technology in geothermal exploration and production wells[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(8): 33-39.

同径分层止水工艺简化了井身结构,节省了管材和成本,但需要在管外投粘土球、灌注水泥浆等。

原平大营地地热探采结合深井是为勘探本区域的地热赋存情况,最后还要作为生产、生活利用的热水井。分层抽水试验获取水文参数后,需要根据出水量和出水温度来确定后续利用哪层水、永久封固哪层水。设计分层止水措施时,管内止水和管外止水都应是临时措施。试验完成后,应该可以解除止水措施,并且解除后应不影响目的含水层的出水和后续利用。为此,本项目设计了新型临时分层止水装置来进行抽水试验。

1 项目概况

原平大营地地热探采结合深井位于山西省原平市沿沟乡王董堡村,设计井深 3060 m,完钻井深 3088 m,终孔口径 215.9 mm。项目任务是钻井勘探变质岩地层的含水量和温度,通过岩心分析、水质测试等方法评价该区域地热资源赋存情况,为地热开发利用提供参数和依据。而后建成水井,供周边生产和生活使用。钻遇地层情况如表 1 所示。

表 1 钻遇地层及岩性描述

Table 1 Drilling strata and geology

地层	深度/m	层厚/m	岩性描述
Q ₃	0~70	70	亚砂土、砂层
Q ₂	70~290	220	卵砾石、亚粘土、砂层、粘土层
Q ₁	290~570	280	亚粘土、砂层、粘土层、卵砾石、砾石层、淤泥质粘土
N	570~3083	2513	角闪变粒岩、黑云变粒岩

井身结构设计为倒塔式三开结构:

一开采用 $\varnothing 393.7$ mm 牙轮钻头、泥浆循环钻进工艺,钻至 492 m;下入 $\varnothing 339.7$ mm 石油套管,管外环空用水泥浆封固。

二开采用 $\varnothing 311.1$ mm 牙轮钻头、泥浆循环钻进工艺,钻至 1554 m;下入 $\varnothing 244.5$ mm 石油套管,部分位置下入滤水管;管外环空不封固。

(3)三开采用 $\varnothing 215.9$ mm 牙轮钻头、泥浆循环钻进工艺,钻至 3088 m 终孔;下入 $\varnothing 177.8$ mm 石油套管,部分位置下入滤水管;管外环空不封固。

井身结构及套管程序参数如表 2 所示。

表 2 井身结构及套管程序

Table 2 Wellbore structure and casing program

井径/mm	钻进深度/m	管径/mm	壁厚/mm	管型	套管起止/m	套管长度/m	套管重叠/m
393.7	492	339.7	8.38	套管	0~492	492	
311.1	1554	244.5	8.94	套管、滤水管	460~1554	1094	32
215.9	3088	177.8	8.05	套管、滤水管	1522~3088	1566	32

2 新型同径分层止水工艺

探采结合井进行分层抽水试验后,需要永久封固非目的含水层,尽量恢复目的层的出水量。因此,需要设计新型临时分层止水装置来进行抽水试验。

2.1 管外止水装置

设计止水伞来进行管外止水。止水伞工作原理类似雨伞,由肋条、帆布、膨胀止水材料组成,如图 1 所示。

(1)肋条由长 500 mm、宽 30 mm、厚 3 mm 的弹性钢条制作而成,底部焊接在套管外,上部自由扩展,如图 1(a)、图 1(b)。

(2)肋条与套管之间衬帆布袋,一侧固定在肋条上端,另一侧固定在套管上,如图 1(c)。

(3)帆布袋内缠绕海带辫、膨胀止水胶带(50 h 膨胀 200%),填充化学膨胀剂等材料;并用铁丝将肋条上端和帆布袋穿插扎口。制作完成后,外径约 $\varnothing 210$ mm。如图 1(d)。

(4)每个止水位置安装 2 个帆布伞,间隔 2 m。帆布伞吸水膨胀后像伞一样撑开,如图 1(e)。撑开的帆布伞外径 $\varnothing 240$ mm 左右,堵塞套管与井壁的环空间隙,起到管外止水的作用。

止水伞实物见图 2。

2.2 管内止水装置

设计止水托盘进行管内止水。该装置由圆钢加工而成,长 200 mm,与套管外径相同,两端壁厚 10 mm。内孔中间部位设置斜面凸起,厚 30 mm,通孔直径根据抽水分层数阶梯设计。如分 4 层抽水,则

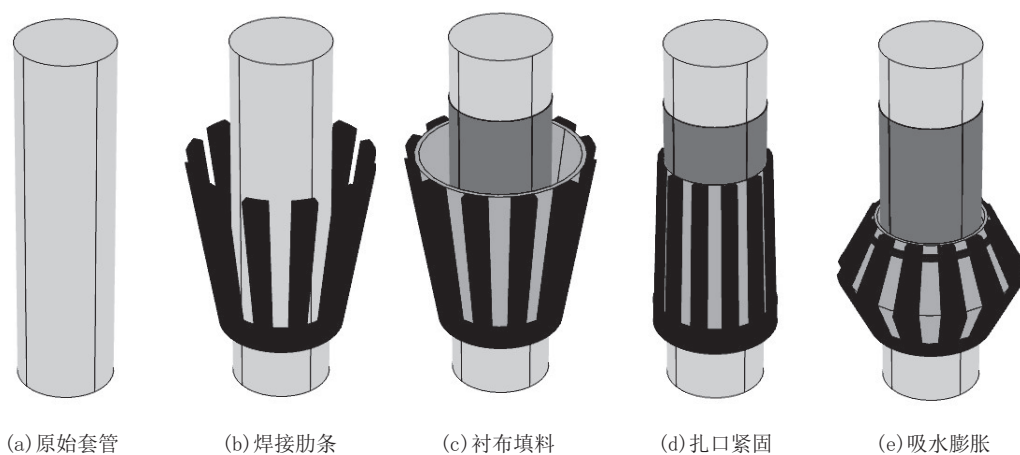


图1 管外止水伞制作流程与工作原理

Fig.1 Manufacturing process and working principle of the canvas umbrella for outside-pipe sealing



图2 止水伞现场实物

Fig.2 Mteral object of canvas umbrella

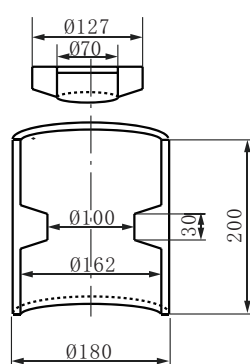
需要使用通孔直径100、120、140 mm的3个止水托盘。止水托盘和隔离盖结构和实物如图3所示。

某层位抽水试验流程为:

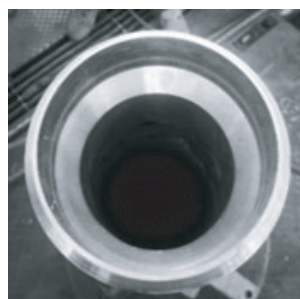
(1)按照设计抽水位置,将止水托盘与套管焊接在一起。小通孔托盘在下,大通孔托盘在上,依次下入井内。

(2)投入相应直径水泥球,堵住抽水层下部托盘口,而后灌入水泥浆候凝,由此堵住下层水。

(3)钻杆接入隔离盖,下至抽水层上部托盘口,依靠钻杆重力堵住上层水。



(a) 纵截面图



(b) 实物俯视图



(c) 实物正视图

图3 管内止水托盘

Fig.3 In-pipe sealing tray

这样,管外通过帆布伞临时止水,管内依靠止水托盘临时止水,可以进行相应层位的抽水试验。

3 现场抽水试验

设计5次抽水试验,第1次对全井段(494~3088 m)采用大泵量进行混合抽水试验;第2~5次

为分层抽水试验,抽水层段为 2665~3088、2158~伞、止水托盘、滤水管,具体如表 3 和图 4(a)所示。
2665、1604~2158、494~1604 m;随套管下入止水

表 3 分层抽水试验设计
Table 3 Design for multi-level pumping test

序号	层位深度/m	含水层	滤水管位置/m	止水伞位 置/m	止水托盘 位置/m
第 1 次	494~3088	混合水		492、494	
第 2 次	2665~3088	第 1 段	2695.7~2741.24;2876.42~2920.29;2999.16~3078.6	2663、2665	2665
第 3 次	2158~2665	第 2 段	2182.51~2249.66;2260.96~2282.47;2305.09~2349.08; 2371.72~2383.03;2405.66~2438.64;2551.72~2627.67	2156、2158	2158
第 4 次	1606~2158	第 3 段	1618.59~1629.71;1697.54~1753.89;1799.09~1854.84; 1956.06~1990.03;2001.34~2012.65;2114.42~2125.69	1604、1606	1606
第 5 次	494~1606	第 4 段	1561.88~1584.43		

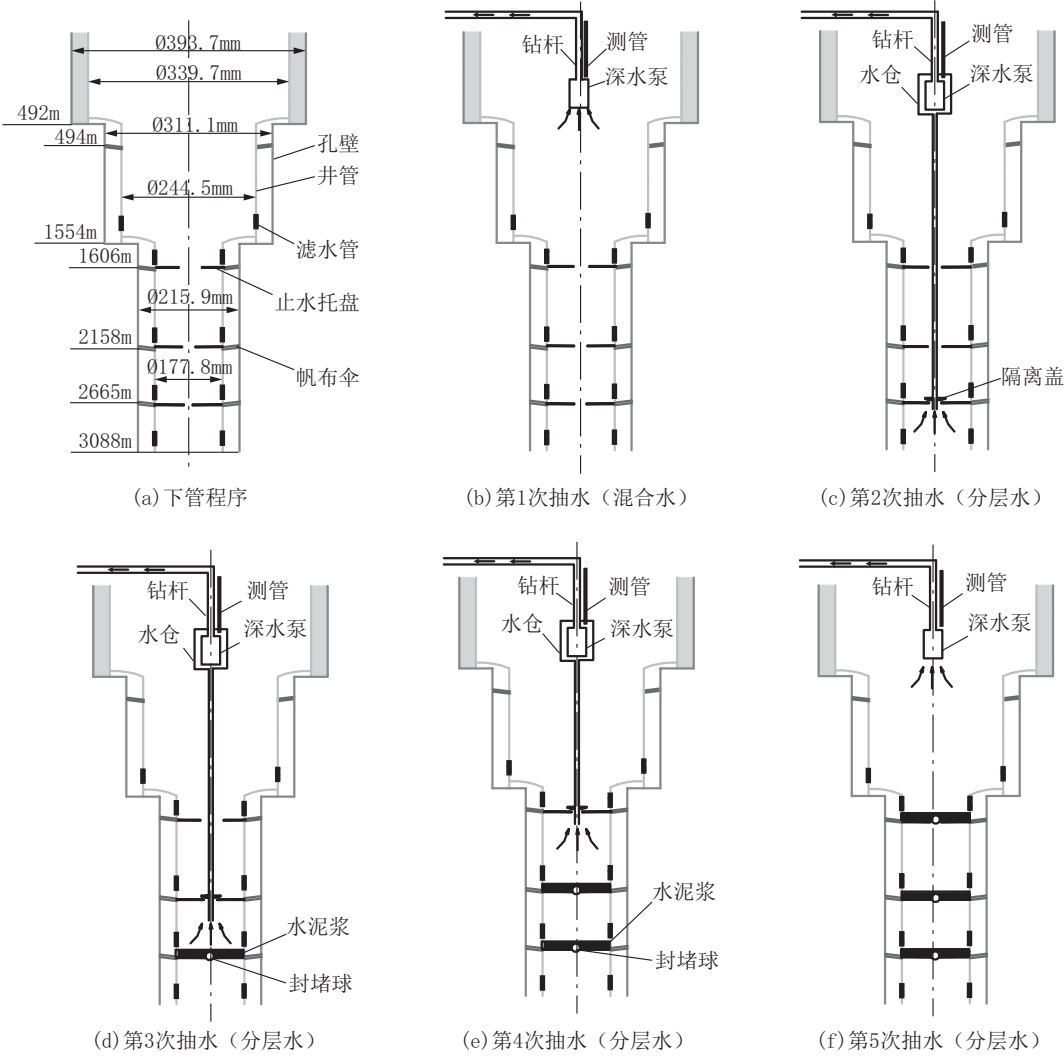


图 4 抽水试验设计

Fig.4 Design for pumping test

管柱下入井内后,止水伞内止水材料吸水膨胀,管外已经分段临时止水。根据抽水试验程序,进行管内止水托盘临时止水。抽水程序为:

(1)第一次抽水:钻杆带着深水泵、水位测管下至450 m,抽取全井段混合水,管内托盘不止水。如图4(b)。

(2)制作抽水水仓,采用 $\varnothing 273\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ 无缝钢管加工,上下端分别与抽水钻杆连接。水仓内置抽水泵和水位测管,电缆及测管接头引出水仓外。

(3)第二次抽水:使用抽水水仓,泵量为 $50\text{ m}^3/\text{h}$ 。钻杆带着隔离盖下至2665 m处止水托盘,隔离盖密封托盘口,钻杆头伸入托盘以下。如图4(c)。

(4)投水泥球封堵2665 m处止水托盘口,注入水泥浆5 m高度,候凝。

(5)第三次抽水:使用抽水水仓。钻杆带着隔离盖下至2158 m处止水托盘,隔离盖密封托盘口。钻杆头伸入托盘以下。如图4(d)。

(6)投水泥球封堵2158 m处止水托盘口,注入水泥浆5 m高度,候凝。

(7)第四次抽水:使用抽水水仓。钻杆带着隔离

盖下至1606 m处止水托盘,隔离盖密封托盘口,钻杆头伸入托盘以下。如图4(e)。

(8)投水泥球封堵1606 m处止水托盘口,注入水泥浆5 m高度,候凝。

(9)第五次抽水:钻杆带着深水泵、水位测管下至450 m,抽取该层段水。如图4(f)。

试验结束确定取水层位后,管内水泥塞用钻头扫通;注入水泥浆至取水层位下部,水泥浆通过滤水管进入管外环空而封固;取水层上部环空的封堵,可以再次下入水泥球堵住托盘口并注入水泥浆候凝,最后管内注入水泥浆,使水泥浆通过滤水管进入环空;候凝后,钻扫管内水泥至取水层上部。

4 应用效果

抽水试验通过变频设备来控制抽水流量,进行3个降深的抽水。出水量采用三角堰计量,读数精确到1 mm。分层水的水位在水仓内进行测量,水仓内测管在泵头之下5 m,以防水流旋涡对水位数据产生影响。对水仓外壁和井壁之间的水位也进行观测,用来检测止水效果。抽水试验成果如表4所示,满足了水文地质参数计算要求。

表4 抽水试验成果

Table 4 Results of pumping test

次序	降深	持续时间/ h	稳定时间/ h	静止水位/ m	仓内平均降深/ m	仓外平均降深/ m	恢复水位/ m	涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	水温/ $^{\circ}\text{C}$
第1次	S3	281.5	48		31.10			169.92	74.00
	S2	34.5	24	+2.57	21.22		+1.45	137.70	72.60
	S1	20	12		10.94			76.87	74.03
第2次	S3	80.5	48		110.90	2.79		57.79	75.71
	S2	39	24	+1.65	74.75	0.97	+1.76	48.84	75.11
	S1	22.5	12		37.03	0		33.52	74.21
第3次	S3	82	48		113.44	6.02		57.56	73.74
	S2	47	24	+3.2	75.88	3.8	+1.64	49.04	73.01
	S1	24	12		38.63	1.45		32.96	72.38
第4次	S3	64	49		119.33	11.75		39.43	67.73
	S2	31	26	5	79.58	10.27	9.5	32.40	66.56
	S1	15	13		39.29	8.43		21.37	65.81
第5次	S3	94	50		19.10			68.30	64.37
	S2	26	24	5.5	13.50		10.36	47.30	60.36
	S1	22	15		6.70			18.14	63.72

注:“+”表示高出井口

(1)根据第2、3、4次持续抽水时间内,水仓与井壁间水位的变化数据,绘制曲线如图5。每条曲线的左段为S3降深抽水阶段,中段为S2降深抽水阶段,右段为S1降深抽水阶段。可以看出,每抽水阶段的水位较平稳,说明止水措施有效,很好阻止了其他含水层的干扰。

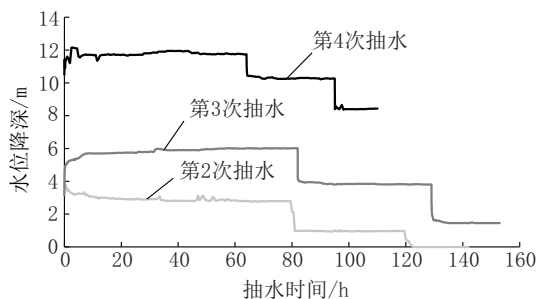


图5 水仓与井壁间水位降深

Fig.5 Water level drop between the water tank and the pipe wall

(2)分层抽水时,管内由钻杆重力压着隔离盖封堵抽水层上部的地层水。若能实现完全封堵,表4中“仓外平均降深”应为0。然而,由于隔离盖与止水托盘的接触面制作误差,无法实现完全接触封堵,会抽走一定量的上部水。另外,随着抽水点上移,钻杆重力减小,无法完全压住隔离盖,导致仓外平均降深逐渐增大。第4次抽水时仓外平均降深明显大于前几次,说明此套止水装置的应用深度有一定的限制。抽水点越深,止水效果越好。

5 结语

本文设计了止水伞进行管外止水、止水托盘进行管内止水的新型同径分层止水工艺,并在地热深井分层抽水试验中成功实施。

(1)该工艺减少了钻井变径次数和施工工序,简化了井身结构,为事故处理预留了一级下套管空间。

(2)通过抽水试验成果可以获得不同井段的地温梯度和涌水量,为准确封闭不取水段提供了依据。

(3)此套止水工艺的管内止水需要钻杆自重压住隔离盖。抽水点越深,所用钻杆越长,其重力增大,可获得更好的止水效果。

(4)止水伞管外止水措施在地热井的应用,依靠其支撑在稳定的变质岩井壁而承受水压,成功分隔堵水。对于砂层、粘土层等不稳定地层,会有井壁不

稳定而导致分隔堵水失败的风险。

参考文献(References):

- [1] 袁振丽.水文地质勘探中抽水试验技术分析[J].中国锰业, 2020,38(3):104-109.
YUAN Zhenli. A technical analysis of pumping test in hydrogeological exploration[J]. China's Manganese Industry, 2020, 38(3):104-109.
- [2] 陈浩文,宋志彬,和国磊,等.多工艺联合洗井和抽水试验在CGSD-01井中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(6):8-13,25.
CHEN Haowen, SONG Zhibin, HE Guolei, et al. Application of multi-process combined well flushing and pumping test in Well CGSD-01[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(6):8-13,25.
- [3] 邓德龙,鲍立新,罗京元.单井分层抽水试验井结构与成井工艺[J].东北水利水电,2019,37(1):26-28,33.
DENG Delong, BAO Lixin, LUO Jingyuan. Structure design and well completion technology of single well stratified pumping test well [J]. Northeast Water Resources and Hydropower, 2019,37(1):26-28,33.
- [4] 冯建月,解伟,吴海东,等.地下水监测工程承压-自流监测井密封技术[J].钻探工程,2021,48(3):146-151.
FENG Jianyue, XIE Wei, WU Haidong, et al. Sealing technology for confined-artesian monitoring wells in groundwater monitoring engineering[J]. Drilling Engineering, 2021,48(3):146-151.
- [5] 郝国利,于建丛,李国民,等.新型分层抽水管内止水装置的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(3):39-43.
HAO Guoli, YU Jiancong, LI Guomin, et al. Development of a new type of intra-tube sealing device for stratified water pumping [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(3):39-43.
- [6] 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 Jibin, PAN Deyuan, LI Bingping, et al. Deep well stratified vacuum pumping test and the mechanism analysis [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(1):18-23.
- [7] 黄义佳.单孔稳定流抽水试验求取水文地质参数[J].西部探矿工程,2019,31(5):173-175.
HUANG Yijia. Calculation of hydrogeological parameters by single hole steady flow pumping test [J]. West-China Exploration Engineering, 2019,31(5):173-175.
- [8] 孔雪,许肖锋,王冬青,等.单井混合抽水试验分层计算含水层渗透系数测试研究[J].工程地质学报,2018,26(S1):494-498.
KONG Xue, XU Xiaofeng, WANG Dongqing, et al. Study on layered calculation of aquifer permeability coefficient in single well mixed pumping test [J]. Journal of Engineering Geology, 2018,26(S1):494-498.

- [9] 李波. 基于分层抽水试验的封隔器结构优化设计[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- LI Bo. Optimal design of packer structure based on stratified pumping test[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2019.
- [10] 李亮, 解伟, 赵胤凯, 等. 双封隔器技术在无锡市 WTS01 井水文地质勘查中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2019, 46(4): 482-486.
- LI Liang, XIE Wei, ZHAO Yinkai, et al. Application of dual-packer technologies to hydrogeologic exploration in Well WTS01, Wuxi city, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2019, 46(4): 482-486.
- [11] 李晓龙, 董书宁, 刘恺德. 多层含水层分层止水技术研究进展[J]. 煤矿安全, 2020, 51(2): 84-90.
- LI Xiaolong, DONG Shuning, LIU Kaide. Research progress of layered water sealing technology in multilayer aquifer[J]. Coal Mine Safety, 2020, 51(2): 84-90.
- [12] 万亿, 韩柳. 基于胶塞法的一孔多层抽水试验分层止水技术及应用[J]. 地下水, 2017, 39(3): 248-249.
- WAN Yi, HAN Liu. Layered water sealing technology and application of one-hole multi-layer pumping test based on rubber plug method[J]. Groundwater, 2017, 39(3): 248-249.
- [13] 王明明, 解伟, 安永会, 等. 封隔注浆分层成井技术在水文地质勘查中的应用研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 50-55.
- WANG Mingming, XIE Wei, AN Yonghui, et al. Study on the application of packed grouting layered well technology in hydrogeological exploration[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2019, 46(1): 50-55.
- [14] 武虎林. 膨胀胶管(气囊)止水器在水文地质孔分层抽水中的应用[J]. 华北自然资源, 2019(5): 112-114.
- WU Hulin. Application of inflatable hose (air bag) water stopper in layered pumping of hydrogeological hole[J]. Huabei Natural Resources, 2019(5): 112-114.
- [15] 张家军, 雷艳. 水文地质深孔抽水试验工艺技术探索[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(5): 40-45.
- ZHANG Jiajun, LEI Yan. Exploration of hydrogeological deep-hole pumping test technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(5): 40-45.
- [16] 张建良. 关于分层抽水试验的技术改进[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(4): 16-19.
- ZHANG Jianliang. Technical improvement on stratified pumping test[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(4): 16-19.
- [17] 张云峰, 孙增兵, 王斌斌, 等. 单孔分层抽水法的改进及在准东煤田的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(3): 92-96.
- ZHANG Yunfeng, SUN Zengbing, WANG Binbin, et al. Amelioration of hierarchical method of single borehole pumping test and its application in Zhundong Coalfield[J]. Coalfield Geology and Exploration, 2016, 44(3): 92-96.
- [18] 周群道, 康凤新, 刘志涛, 等. 抽水试验方法和成井工艺类型对热储层水文地质参数的影响[J]. 山东国土资源, 2018, 34(10): 106-114.
- ZHOU Qundao, KANG Fengxin, LIU Zhitao, et al. Effects of pumping test methods and well completion technology types on hydrogeological parameters of thermal reservoirs[J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(10): 106-114.

(编辑 李艺)