

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202204012

董崇泽, 孙智杰. 硬岩水文地质参数井同径止水与分层抽水试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 55-61.

DONG Chongze, SUN Zhijie. Experimental investigation on same diameter sealing and stratified pumping of hard rock hydrogeological parameter well[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 55-61.

硬岩水文地质参数井同径止水与分层抽水试验研究

董崇泽¹, 孙智杰²

(1. 山西能源学院, 山西 晋中 030600; 2. 山西省第三地质工程勘察院, 山西 晋中 030620)

摘要: 针对传统施工程序无法解决坚硬岩石止水环隙很小(仅 3 mm)钻孔的同径止水及分层抽水试验问题, 以山西某水文地质参数井为研究对象, 采用现场和室内综合试验的方法, 对同径止水方案、材料、技术、分层抽水等工艺进行研究。结果表明: (1) 同径止水装置经过特殊的“外掏内缩”设计与制作, 使止水外环间隙由 3 mm 增大到 8.5 mm, 解决了“极小止水环隙”下的同径止水问题; 经抽水检验, 止水效果良好。(2) 在孔外一系列试验的基础上, 定制的止水材料和选择的止水组合与本孔的适应性强, 下管风险小, 实施过程相当顺利。(3) 专门设计的分层导水管路, 其上串接的隔离封水胶球与止水套管柱内设置的锥形隔水接头相互契合, 封水可靠, 形成了两套独立的导水管路, 满足了上、下含水层分层抽水试验的工况。研究结果可为类似水文地质参数井开展同径止水或分层抽水试验研究提供参考。

关键词: 硬岩深孔同径止水; 外掏内缩接头; 止水材料与组合; 隔离封水胶球; 锥形隔水接头; 分层抽水

中图分类号: P642.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)04-0055-07

Experimental investigation on same diameter sealing and stratified pumping of hard rock hydrogeological parameter well

DONG Chongze¹, SUN Zhijie²

(1. Shanxi Institute of Energy, Jinzhong, Shanxi 030600, China; 2. Shanxi Provincial Third Institute of Geological Engineering Investigation, Jinzhong, Shanxi, 030620, China)

Abstract: On account of the problem of the same diameter sealing and stratified pumping test in a hard rock borehole with very small water-sealing ring gap (only 3 mm) unsolved by traditional construction procedures, taking the hydrogeological parameter well located in Shanxi Province as the research object, the in-situ and laboratory comprehensive tests are employed to implement the research on the construction process of same diameter water sealing plans, materials, technology, as well as the stratified pumping test. Results show that, (1) as for the water sealing device with the same diameter, the outer of the water sealing ring gap is increased from 3 mm to 8.5 mm by special design and manufacture of “cut out and shrink in” to solve the problem of same diameter water-sealing under the situation of extremely small water sealing ring gap, which performs well via the pumping test inspection. (2) Based on the series of tests research outside the bore hole, the custom-made “sealing material” and selected “water sealing combination” have strong adaptability with the hole, and the implementation of down-pipe goes rather smooth with low risk. (3) The stratified aqueduct is specially designed, on which the

收稿日期: 2022-04-10; 修订日期: 2022-06-01

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 山西省政府购买科技创新项目(晋地水发[2021]10号)

第一作者: 董崇泽(1968-), 男, 副教授, 主要从事地质工程、岩土工程、矿业工程等方面教学与研究工作。E-mail: dchz@163.com

通讯作者: 孙智杰(1959-), 男, 教授级高工, 主要从事岩土工程技术与管理工作。E-mail: 2668720192@qq.com

concatenated isolation sealing rubber ball fit well with the conical water isolating joint set in the waterproof casing pipe. The water sealing is reliable, and two sets of independent aqueduct are formed to meet the stratified pumping test of the upper and lower aquifers. The research results can provide reference for the same diameter water sealing or stratified pumping test of similar hydrogeological parameter wells.

Keywords: hard rock deep hole same diameter water sealing; cut out and shrink in joints; water sealing materials and combinations; isolation sealing rubber ball; conical water isolating joint; stratified pumping

对于煤田(井田)地质勘探和供水水源地勘查项目,目前我国一般都要根据勘探范围的地质构造情况,布置若干眼水文地质钻井(水文参数井)。对于孔径大、地层软、孔深小(500 m左右)的项目,传统的施工程序有两种:一是全孔一径取芯,自上而下逐级抽水试验、逐级扩孔下管止水;二是逐段取芯、逐段抽水试验、逐段下管止水。孔内止水组合大致分为“护孔套(井)管+管外止水材料”及“充气(液)型止水胶囊”两种,对于隔水层孔壁完整、同径多层抽水,一般采用充气(液)型止水胶囊。管外止水材料大致分为“水化固结型”和“遇水膨胀型”,前者多为水泥浆液、油石灰等材料,后者包括黄豆、海带、黏土球、膨胀胶带、膨胀胶粒等。当前,对于钻孔(水井)直径大、孔径与管径级差大、固井止水段较长的项目,多采用“水化固结型”止水材料或“气、液压止水胶囊”止水方式。反之,则多采用“遇水膨胀型”止水材料^[1-2]。近年来,在地热勘查孔(井)项目中,曾取得过一些“充气(液)型止水胶囊”和“套管+止水材料”同径止水、分层抽水成功案例,其止水装置下入孔深2 000~3 000 m,分层组数2~3层,止水环隙18~25 mm。

国外在供水井成井和水文试验井方面,可供查阅的资料比较少且比较老。据20世纪90年代美国某公司《水井钻探手册》介绍,多采用“水泥灌浆止水”技术,主要固井止水材料有混凝土浆、砂水泥浆和纯水泥浆,主要灌浆方法有重力充填法、导管灌注法、强力灌入法、连续注入法等。对于油气田探采结合水文试验井项目,为了简化井身结构、优化施工流程、缩短施工周期,多采用“二开井身结构、两径施工流程、全套管水泥固井、分段射孔、分段双封隔器隔离抽水”的作业工序^[3]。

根据山西某水文地质参数井项目技术要求,需要本次试验研究在(1)止水孔段岩石坚硬且破碎,难以分级扩孔,下管止水;(2)止水环隙仅3 mm,无法安放止水材料;(3)含水层段孔壁不规整,下管风险大;(4)止水套管内径较小,导水管路设计复杂等四方面,取得技术突破,实现项目实施目的^[4]。

基于钻探施工不可逆的特点,试验研究工作的重点是入孔前的设计制作与试验研究环节。在止水装置的装配、膨胀止水材料的模拟试验、导水管路的组合与调整等方面,要把试验过程中发现的问题在入孔前彻底解决,否则,轻则要处理复杂的孔内事故、耗时耗力,重则造成钻孔报废。

1 试验研究背景

1.1 设计总体要求

(1) 钻孔设计参数:深度1 000 m,其中,覆盖层约400 m,变质岩地层约600 m;

(2) 取芯要求:覆盖层间断取芯与岩样捞取相结合,变质岩层段连续取芯;

(3) 分层止水要求:覆盖层水泥固孔,变质岩地层选取合适的隔水层按上、下层段分层止水;

(4) 分层抽水要求:覆盖层不抽水,变质岩地层按上、下层段三个落程分层抽水及上下段三个落程混合抽水;

(5) 止水套管程序:地质套管 $\phi 168\text{ mm}\times 410\text{ m}$ 、 $\phi 89\text{ mm}\times 1\,000\text{ m}$;

(6) 留设水文地质长观孔:变质岩段按上下层,分别设置水位观测通道和双通道孔口板及保护罩,予以上锁保护。

1.2 主要研究内容

对于分层止水、分层抽水,试验与研究的主要内容包括:(1)同径止水装置设计方案比选与装配;(2)止水材料试验与选型;(3)分层导水管路设计;(4)止水套管与泵室套管、止水套管与导水管路之间的重叠与密封;(5)分层抽水试验过程。

1.3 技术路线

试验与研究遵循的技术路线为:技术重点、难点分析→总体方案设计→方案设计遴选→技术设计图纸绘制与机加工→装配试验尺寸核验与问题分析→设计数据调整与再次机加工→再次装配试验与尺寸核验→止水装置入孔前的风险评估→钻探现场止水管柱入孔实施→止水管柱效果初步检验(适时浸

泡,适当提拉)→按设计要求进行分层抽水试验→止水效果综合检验。

2 试验结果与数据

2.1 止水设计方案

2.1.1 止水方案原理简述

套管改造止水装置(A方案):选取2节长5m左右 $\phi 89$ mm地质套管,在管外焊接4只托盘形成台阶,在其段间设置膨胀止水材料组合(特制膨胀胶带2组+食用海带1组),实现套管外分层止水。在套管内部焊接锥形隔水台阶,与分层抽水管路上的锥形隔水胶球相互配合,实现分层抽水。具体见图1(a)。

组合式厚壁管止水装置(B方案):主要创新点为

设置“外掏内缩”式特殊组合接头。包含止水接头和隔水接头两部分,采用厚壁钢管胚料或实心圆钢进行制作。止水接头胚料外径约95 mm、内径约45 mm,每节总长度约900 mm,每组3节,设计要素相同。作为设置“膨胀止水组合”(特制膨胀胶带2组+食用海带1组)的载体。内部设置锥形隔水接头(大径78 mm,小径52 mm,30°锥角,内台阶投影宽度13 mm),单独制作并与止水套管柱串接。具体见图1(b)。

膨胀胶粒伞式止水装置(C方案):该方案止水装置外部、内部设计原理及加工制作与B设计方案完全相同,只是采取的止水组合有所不同。止水组合为:膨胀胶带2组+膨胀胶粒伞1组,底部的止水组合采用水泥伞止水组合代替食用海带止水组合。具体见图1(c)。

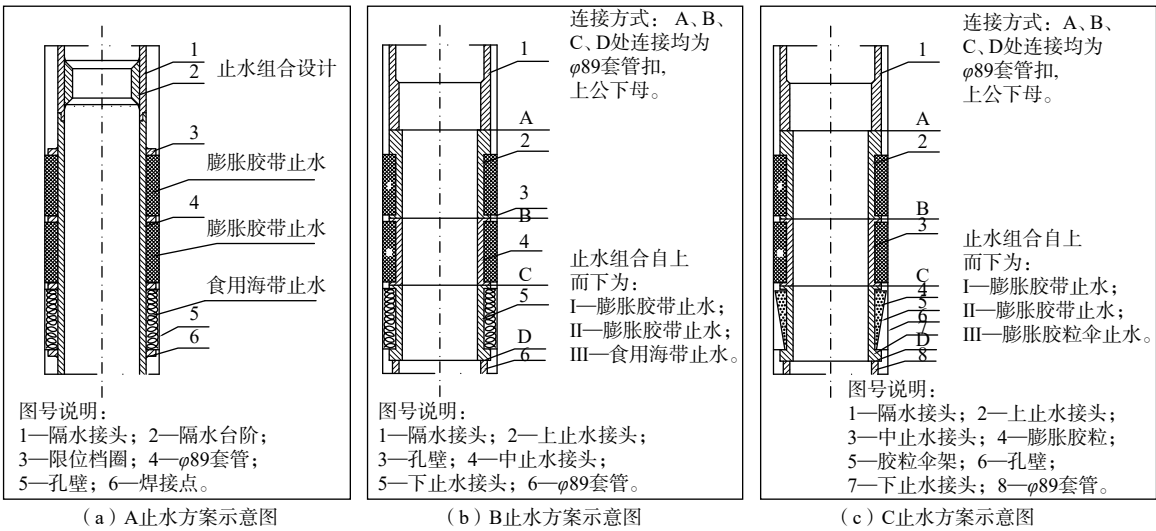


图 1 3 种止水方案示意图
Fig. 1 Schematic diagram of three water-stopping schemes

2.1.2 试验结果及数据

按照上述3种止水方案,绘制技术设计图纸,分别制作、装配止水组件,利用初步选定的遇水膨胀型止

水材料,进行室内实际装配试验与尺寸核验,所获得的试验数据与可行性评价结果见表1。

表 1 3 种止水方案试验项目与可行性评价结果

Table 1 Test items and feasibility evaluation results of three water-stopping schemes

方案	理论孔径/mm	装配外径/mm	膨胀外径/mm	充盈比/%	组合特征	实施可行性
A方案	95	111	131	138	胶带+海带	装配外径超径无法入孔
B方案	95	93	140	147	胶带+海带	装配外径比较合适
C方案	95	93	145	153	胶带+胶粒	水泥伞装配整型困难

2.2 止水材料试验与止水组合选型

2.2.1 止水材料试验:

选择建筑行业常用的2种遇水膨胀型止水材料进行浸泡膨胀性能试验。分别取不同吸水膨胀材料,在

常温常压条件下,浸泡并记录开始时间,观察浸泡过程中其体积、形状的变化,并测算出它们的膨胀率。室内试验数据见表2。试验图片见图2和图3。对选择的止水材料委托厂家进行了规格定制。

表 2 3 种膨胀止水材料室内浸泡试验性能数据

Table 2 Indoor immersion test performance data of three kinds of expansive water-stopping materials

材料名称	规格	形状	浸泡/h	膨胀率/%	性状描述
膨胀胶带	宽100 mm、 厚10 mm(定制)	矩形条带状	36	厚200, 宽120	形状不变, 体积增大, 边界规整, 有些类似产品呈絮状边界, 不适宜
优质食用海带	无	薄片状	8	200	体积净增加1倍, 形状仍为薄片状, 无絮状边界, 具有一定的强度
吸水膨胀胶粒	无	颗粒形态直径, 约1.0 mm	6	200	体积净增加1倍, 形状仍为粒状, 无絮状边界, 强度很弱, 靠其膨胀后溢出伞体外形成环状体进行止水

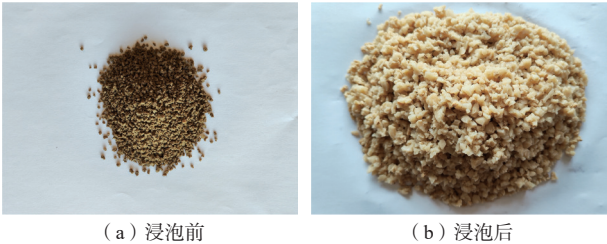


图 2 吸水膨胀胶粒浸泡颗粒膨胀情况
Fig. 2 Swelling of soaked particles of water absorbing and expanding rubber particles

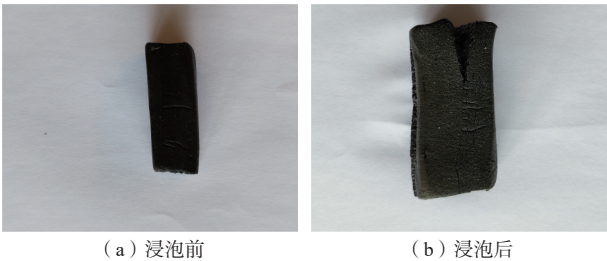


图 3 特制膨胀胶带浸泡前后厚度变化
Fig. 3 Thickness change of special expansion tape before and after soaking

2.2.2 止水组合选型

由于其中 2 种膨胀止水材料具有吸水膨胀、形体易于包裹固定的特点, 结合下放作业技术要求, 最终选择的止水组合为: 自上而下, 上节膨胀胶带止水→中节膨胀胶带止水→下节食用海带止水。

2.3 分层抽水导水管路设计

2.3.1 设计思路

在 $\phi 89$ mm 止水套管内设置一套“分层抽水导水管路”, 借助套管内“锥形隔水接头”与导水管路上的“锥形隔水胶球”配合, 分别进行上、下层分层抽水。

2.3.2 管路组合

① 下层抽水导水管路: 正、反丝接头 → $\phi 50$ mm 钻杆约 640 m → $\phi 42$ mm 钻杆串接锥形隔水胶球 → $\phi 42$ mm 钻杆 1 根 → 钻杆尾部封水堵头(开放)。

② 上层抽水导水管路: 正、反丝接头 → $\phi 50$ mm 钻杆约 640 m → 进水筛管 1 根 → $\phi 42$ mm 钻杆串接锥形隔水胶球 → $\phi 42$ mm 钻杆 1 根 → 钻杆尾部封水堵头(封堵)。

2.3.3 止水套管($\phi 89$ mm)与泵室套管($\phi 168$ mm)重叠密封

由于泵头下深与泵室套管下深相差约 220 m, 抽水孔段水流需由管路导入泵室套管之中, 因此, 拟采取 $\phi 89$ mm、 $\phi 168$ mm 套管重叠, 设置密封材料等技术措施, 密封两级套管环状间隙, 避免下层抽水时, 上层水的混入泵室之中而影响下层抽水试验数据。

3 讨论与分析

3.1 止水方案的比选

A 方案: 理论计算数据和实际装配存在如下技术问题: (1) 钻孔孔径与止水套管外径之间的理论环状间隙仅有 3 mm, 无论采用何种材料, 几乎无法实现; (2) 在止水套管内直接焊接锥形隔水台阶, 无法控制其平正度和焊接时的管体变形; (3) 无法进行锥形隔水台阶的双向焊接^[5]。

B 方案: 该套设计采用厚壁钢管或实心圆钢分体制作。该设计方案具有如下优点: (1) 止水材料载体采取“外径内掏”方法, 使止水环状间隙由 3 mm 增大到 8.5 mm; (2) 3 节止水装置采取单节整体加工制作, 克服了因焊而引起的管体变形、强度不足和锥形隔水台阶不规矩等技术难题; (3) 各节止水装置之间采用 $\phi 89$ mm 标准套管螺纹连接, 能够充分保证其连接强度和刚度、各节之间的同心度及锥形隔水台阶的规矩性。

C 方案: 该套设计方案底部的水泥伞装置, 其伞架体由薄铁皮制作, 呈倒锥形、条带状, 固定于下止水接头之外。其内充填的吸水膨胀胶粒在孔内浸泡后膨胀, 分别从伞架体带状缝隙和顶端溢出, 在环状间隙内, 形成一段止水密封体。经过室内试验, 锥形伞架体整型、安装困难, 可充填膨胀胶粒的空间太小, 下管过程中伞架体具有一定的失效风险, 不宜实施^[6-8]。

经过以上探讨与分析, 综合考虑加工制作和孔内施工风险因素, 最终选择同径止水的 B 方案。

3.2 止水材料分析与选型

对于同径止水材料选型而言, 水泥浆液由于配比难以掌握, 灌注工艺比较复杂, 施工风险大, 加之止水

孔段孔径与止水套管环状间隙很小; 套管内很难设置单向注浆装置, 灌注完毕还得处置该装置, 风险较大。因此, 水泥止水材料应该予以排除^[9-10]。

采用遇水膨胀型止水材料进行管外分层止水, 在排除了止水组合底部的“伞架体+膨胀胶粒”组合之后, 保留了膨胀胶带和食用海带。其原因是在施工现场的安装固定, 控制外形尺寸以及下放过程控制方面均有可行性, 施工风险较低, 成功率较高。

建筑常用的膨胀胶带为成型产品, 膨胀率高, 性能稳定, 宽 20 mm、厚 10 mm, 每盘 20 m。定制的规格为宽 100 mm、厚 10 mm, 具有一定的可塑性, 其厚度与宽度可根据止水孔段直径对止水装置的安装尺寸要求, 进行适当加工整形; 还具有一定的强度和韧性, 能够完全满足捆绑固定的要求。食用海带价格低廉, 选材广泛, 膨胀率较高, 易于有效控制外形尺寸和捆绑固定, 下管过程安全可靠。为确保止水作业过程安

全顺利, 膨胀止水材料捆绑固定完毕, 在其外应当包扎固定一层棉布并涂抹润滑油。

3.3 分层导水管路分析

在管外实施同径止水的基础上, 通过管内设置的锥形隔水接头与导水管路上串接的锥形封水胶球的组合实现分层抽水作业。按照项目抽水技术要求, 分别实施下段、上段含水层抽水以及上下含水段混合抽水。在施工现场, 经过对套管内封水组合入孔前试验, 发现封水效果能够完全满足分层抽水试验要求, 锥形隔水接头的内腔直径与锥形封水胶球的外部直径完全满足通路要求, 施工风险很小, 下孔作业可行。

由图 4 可知, 分层导水管路完全符合项目设计技术要求。在实施时, 上层抽水进水筛管的进水总面积(单只孔眼面积×孔眼数量)与下层抽水堵头处进水面积按照等面积原则设计, 确保不同工况下水流参数相对平衡^[11-13]。

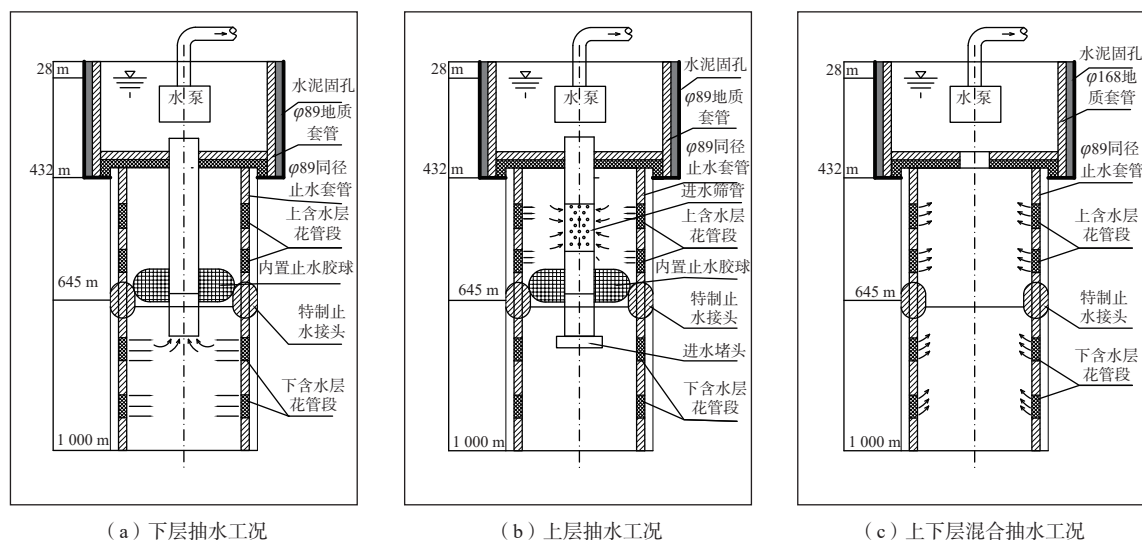


图 4 3 种抽水工况示意图

Fig. 4 Schematic diagram of three water-stopping schemes

3.4 分层抽水试验数据与分析

3.4.1 分层抽水试验

三次抽水试验段: 第一次, 下层(645~1 000 m), 见图 4(a); 第二次, 上层(432~645 m), 见图 4(b); 第三次, 上下层混合抽水试验段(432~1 000 m), 见图 4(c)。采用 150QJ20-150 型潜水电泵进行抽水试验, 潜水电泵泵头下入深度 110 m 左右。

3.4.2 抽水试验数据

水文参数井分层抽水数据见表 3。

3.4.3 数据分析

由表 3 抽水试验数据可知, 本次“同径止水”效果

较为理想。具体表现为: (1) 上下含水层分层抽水时, 其最大出水量相差 $5.43 \text{ m}^3/\text{h}$, 上下两段富水性差异十分明显, 上段富水强; (2) 在出水量相近的情况下, 上下两段降深数值相差很大, 出水量为 $15.26 \text{ m}^3/\text{h}$ 时下层比上层降深大 69.79 m, 出水量为 $10.07 \text{ m}^3/\text{h}$ 时下层比上层降深大 46.05 m, 上段富水强; (3) 上下层静止水位埋深分别为 20.30 m 和 20.71 m, 相差 0.41 m, 差异明显; (4) 最大出水量时, 上下层孔口出水水温相差 0.5°C , 下层高于上层。

3.5 问题与建议

(1) 本次试验研究虽然解决了同径条件下“极小

表 3 水文参数井分层抽水数据表

Table 3 Summary of layered pumping data of hydrological parameter well

抽次	控制流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	降深/m	单位涌水量/($\text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	影响半径/m	渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	静止水位/m	最高水温/ $^{\circ}\text{C}$
第一次(下层)	15.26	92.79	0.045 7	156.50	0.028 5	20.71	46.5
	10.07	61.15	0.045 7	100.40	0.027 0		46.0
	5.90	35.70	0.045 9	56.47	0.025 0		45.5
第二次(上层)	20.69	31.30	0.183 6	123.70	0.156 1	20.30	46.0
	15.26	23.00	0.184 3	89.02	0.149 8		45.5
	10.07	15.10	0.185 3	56.71	0.141 1		45.0
第三次(混合)	30.71	30.05	0.283 9	92.53	0.094 8	20.45	46.5
	22.12	21.05	0.291 8	64.04	0.092 6		46.0
	13.03	13.03	0.299 2	35.66	0.086 9		45.5

外环隙”止水难题,但对于 3~4 层的分层止水,得下入 2~3 组止水装置,相对于下入 1 组止水装置,存在诸多需进一步研究解决的问题,比如:止水组合的调整、膨胀止水材料的时间参数、下管过程时间控制等。建议实施者应当结合类似项目的设计要求及钻孔的结构具体情况,对上述技术问题开展针对性试验与研究,以保证项目的顺利实施^[14]。

(2) 在本次试验研究中,分层导水管路采用了其上串接的“隔离封水胶球”与止水套管内设置的“锥形隔水接头”相互契合封水的设计理念,这对于完成 3~4 层的抽水试验局限性很大。尤其是对小口径“分层抽水”项目,止水套管内径与导水管线外径之间级差很小,自上而下设置内径由大变小的“锥形隔水接头”则非常困难,封水效果难以保证。建议实施者应在两个方向拓宽思路:其一,按照本项目设计理念,采用“外平式连接”的导水管线,合理分配各级“锥形隔水接头”内径级差,在充分试验密封性能的基础上,论证其技术可行性,为完成分层抽水试验清除技术障碍。其二,止水套管内不设“锥形隔水接头”,变为“内平通径”管,导水管路上串接石油工程常用的“单组或双组封隔器”,自下而上实现逐层抽水试验^[15-17]。

(3) 本次试验研究针对的钻孔是采用标准口径系列的“金刚石绳索取芯钻进工艺”完成的,而对于采用“普通钻进”工艺完成的钻孔,由于其孔壁光滑与规矩,采芯率以及孔斜控制存在着相对不足,同径止水技术还需要进行一些试验与研究。对于小口径水文参数井“小环隙同径分层止水、抽水”项目,地层岩芯的采取率和完整程度非常重要,它是选取“隔水层段”位置和“止水装置”设置深度的重要依据。建议实施者在选择钻探工艺时,应当优先选用标准口径系列“金刚石绳索取芯钻进工艺”。

4 结论

(1) 同径止水装置经过特殊的“外掏内缩”设计与制作,外径、内径尺寸设计合理,使止水环隙由理论上的 3 mm 增大到 8.5 mm,既解决了极小环隙条件下分层止水问题,又兼顾到止水套管内下入导水管路问题。经抽水检验,止水效果良好。

(2) 在孔外一系列试验研究和问题分析的基础上,所选择的遇水膨胀型止水材料和止水装置组合,对于本次的试验钻孔而言,膨胀充盈率高、止水组合整体性能可靠、适应性较强,下管作业风险较小,施工过程十分顺利。

(3) 分层导水管路设计合理,其上串接的隔离封水胶球与止水套管柱内设置的锥形隔水接头相互契合,形成了两套独立的导水管路,进行分层抽水时,均能将上、下含水层的水流导入泵室套管之中,完全满足分层抽水试验工况。

参考文献 (References) :

- [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: 434 - 438. [China Geological Survey. Handbook of hydrogeology[M]. 2 ed. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 434 - 438. (in Chinese)]
- [2] 王达, 何远信. 地质钻探手册[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2014: 323 - 343. [WANG Da, HE Yuanxin. Geological drilling handbook[M]. Changsha: Central South University Press, 2014: 323 - 343. (in Chinese)]
- [3] 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. Application of the technology of injecting cement for the stratified well completion to hydrogeological exploration[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(1): 50 - 55. (in Chinese)]

- with English abstract)]
- [4] 地热钻探技术规程: DZ/T 0260—2014[S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2014. [Technical specification for geothermal drilling: DZ/T 0260—2014[S]. Beijing: Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. (in Chinese)]
- [5] 《地质管材手册》编写组. 地质、水文、石油钻探管材手册[M]. 北京: 地质出版社, 1975: 59—67. [*Geological Pipe Manual* Compilation Group. Geological, hydrological and petroleum drilling pipe manual[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1975: 59—67. (in Chinese)]
- [6] 张建良, 李文鹏, 孙梓航, 等. 集束式监测井成井工艺研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 44—48. [ZHANG Jianliang, LI Wenpeng, SUN Zihang, et al. A study of the well-forming technology of a cluster monitoring well[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 44—48. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 叶成明, 邢卫国, 冯志仁. 新型的地下水监测井——多级完整监测井[C]//严重缺水地区地下水勘察论文集(第二集). 北京: 地质出版社, 2004: 197—200. [YE Chengming, XING Weiguo, FENG Zhiren. A new type of groundwater monitoring well: Multi-level complete monitoring well[C]//Symposium of groundwater exploration in severely water shortage areas (Volume II). Beijing: Geological Publishing House, 2004: 197—200. (in Chinese)]
- [9] 齐治虎, 刘国卫. 岩芯钻探中复杂地层的护孔工艺[J]. 西部探矿工程, 2021, 33(11): 49—52+57. [QI Zhihu, LIU Guowei. Hole protection technology for complex strata in core drilling[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2021, 33(11): 49—52+57. (in Chinese)]
- [10] 刘鑫. 高温大温差低密度水泥浆体系的室内研究[J]. 西部探矿工程, 2021, 33(11): 65—67. [LIU Xin. Laboratory study on low density cement slurry system with high temperature and large temperature difference[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2021, 33(11): 65—67. (in Chinese)]
- [11] 邓德龙, 鲍立新, 罗京元. 单井分层抽水试验井结构设计成井工艺[J]. 东北水利水电, 2019, 37(1): 26—28. [DENG Delong, BAO Lixin, LUO Jingyuan. Structure design and completion technology of single well completed stratified pumping test[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2019, 37(1): 26—28. (in Chinese)]
- [12] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 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 stratified water stop technology for multilayer aquifer[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(2): 84—90. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 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. One hole multi-layer pumping test layered water stop technology based on rubber plug method and its application[J]. *Ground Water*, 2017, 39(3): 248—249. (in Chinese)]
- [15] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 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]. *Coal Geology & Exploration*, 2016, 44(3): 92—96. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 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. Influence of pumping test method and well completion technology type on hydrogeological parameters of thermal reservoir[J]. *Shandong Land and Resources*, 2018, 34(10): 106—114. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华

实习编辑: 刘真真