

国家地下水监测井建设关键问题研究

卢予北^{1,2}, 李 艺^{3,4}, 陈 莹^{1,5}, 王建华⁶, 申云飞^{1,5}

(1. 河南省深部探矿工程技术研究中心, 河南 郑州 450053; 2. 河南省地矿局第二地质环境调查院, 河南 郑州 450053; 3. 《探矿工程(岩土钻掘工程)》编辑部, 北京 100037; 4. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 5. 河南省地热能开发利用有限公司, 河南 郑州 450053; 6. 河南省郑州市节约用水办公室, 河南 郑州 450000)

摘要:国家地下水监测工程建设由国土资源部和水利部联合立项申报, 历经 10 余年的可行性研究和评估论证, 最终由国家发展和改革委员会批准实施。项目财政投资 20 多亿元, 覆盖全国 31 个省、区、市及新疆建设兵团, 涵盖了全国 7 大流域和 16 个重要水文地质单元, 共布设 20401 个地下水监测站点。项目的组织实施意义重大, 事关地质环境、饮水安全和经济社会的可持续发展等民生问题。其中, 钻探工程决定着国家地下水监测工程建设的质量、运行效果及使用寿命。本文针对项目“地域分布广、施工战线长、地质条件复杂”等特点, 从组织管理、钻井结构设计、成井管材和钻进工艺选择等方面的关键问题进行了分析研究, 并提出了具体建议。

关键词:国家地下水监测工程; 地下水监测井; 钻进工艺; PVC-U 井管; 泵吸反循环

中图分类号: P634; P641.74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2016)06-0001-06

Analysis on Key Issues of National Groundwater Monitoring Well Construction/LU Yu-bei^{1,2}, LI Yi^{3,4}, CHEN Ying^{1,5}, WANG Jian-hua⁶, SHEN Yun-fei^{1,5} (1. Henan Engineering Research Center of Deep Exploration, Zhengzhou Henan 450053, China; 2. No. 2 Institute of Geo-environment Survey of Henan, Zhengzhou Henan 450053, China; 3. The Editorial Board of Exploration Engineering, Beijing 100037, China; 4. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 5. Henan Geothermal Energy Development and Utilization Ltd., Zhengzhou Henan 450053, China; 6. Water Saving Office of Zhengzhou City, Henan Province, Zhengzhou Henan 450000, China)

Abstract: The national groundwater monitoring well construction project is established and applied by Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China and Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, which is approved by National Development and Reform Commission with the experience of feasibility study and evaluation for more than 10 years. With over 2 billion yuan of the total financial investment, the project covers 31 provinces and Xinjiang Production & Construction Corps including 7 large basins and 16 important hydrogeological units with 20401 groundwater monitoring sites. The organization and implementation of the project is of great significance, which is related to the livelihood issues of geological environment, drink water safety, economic and social sustainable development and so on. In this project, the drilling engineering determines the quantity, running effects and service life of national groundwater monitoring wells. In view of the characteristics of wide geographical distribution, long construction lines and complex geological conditions of the project, this paper analyzes the key points of construction management, well construction design, pipe for well completion and drilling technology selection with detailed suggestions.

Key words: national groundwater monitoring project; groundwater monitoring well; drilling technology; PVC-U well pipe; pump suction reverse circulation

1 国家地下水监测工程立项背景及概况

随着工业化、城镇化和现代农业化进程的迅速发展, 资源与环境形势的矛盾日趋严峻。特别是地下水资源污染和资源量不足问题将严重影响着经济社会的发展和地下水环境。据水利部官方网站 2016 年 1 月《地下水动态月报》统计数据, 分布于松

辽平原、黄淮海平原、山西及西北地区盆地和平原、江汉平原的 2103 个地下水监测点显示: IV 类水 691 个, 占 32.9%; V 类水 994 个, 占 47.3%, 两者合计占比为 80.2%。主要污染指标中“三氮”污染情况较重, 部分地区存在一定程度的重金属和有毒有机物污染。与此同时, 除污染问题外, 超采也是我国保

收稿日期: 2016-05-26

基金项目: 2015 年度河南省国土资源科技项目“空气潜孔锤+井下电视技术在基岩构造水勘查中应用研究”(编号: 2015-27)

作者简介: 卢予北, 男, 汉族, 1964 年生, 二级教授, 省级工程技术中心主任, 河南省学术技术带头人, 工学博士, 地质工程专业, 主要从事深部科学钻探、地质新能源勘查技术研究与管理工作, 河南省郑州市南阳路 56 号, lu-yubei@263.net; 李艺, 女, 汉族, 1962 年生, 《探矿工程(岩土钻掘工程)》杂志主编, 教授级高级工程师, 探矿工程专业。

障“水安全”的一大威胁。2016年1月,全国主要平原区地下水储量比2015年同期减少82.4亿 m^3 ,仅黄淮海平原就减少了49.2亿 m^3 。其中,以河北地区地下水储量减少为首。一年间,河北地区减少了22.1亿 m^3 的地下水。

为此,国土资源部和水利部联合立项申请,经历了10余年的可行性研究和评估论证,2014年7月22日,国家发展和改革委员会批复了《国家地下水监测工程可行性研究报告》。2015年3月,国土资源部办公厅下发了《国家地下水监测工程组织实施方案》,2015年9月,国土资源部、水利部联合下发了《关于支持国家地下水监测工程建设的通知》,并要求相关部门加强协调,密切配合,切实做好组织实施工作。至此,针对地下水监测,我国首次启动了大规模建设工程。本次重大工程财政投资20多亿元,共布设20401个地下水监测站点,覆盖31个省、区、市及新疆生产建设兵团,涵盖了全国7大流域和16个重要水文地质单元。主要建设内容为:国土资源部与水利部联合建设1个国家地下水监测中心;国土资源部建设10103个地下水监测站点、31个省级地下水监测中心和信息节点,改建2个地下水均衡试验场、1个地下水与海平面综合监测站;水利部建设7个流域监测中心、32个省级监测中心(含新疆生产建设兵团)、280个地市节点,新建及改建地下水监测站点10298个。国家地下水监测工程建设总工期为3年,2015年重点开展华北地区地下水监测点建设,启动东北和西北地区地下水监测点建设,兼顾中南、东南、西南地区地下水监测点建设;2016年全部完成华北地区地下水监测点建设,基本完成东北和西北地区地下水监测点建设,开展中南、东南、西南地区地下水监测点建设;2017年全部完成东北、西北、中南、东南、西南地区地下水监测点建设,并开展项目竣工验收工作。

2 国家地下水监测工程建设意义

据中国地质调查局介绍,国家地下水监测工程建成后,可扩大国家地下水监测站点的控制范围和站网密度,监测控制范围达到350万 km^2 ,监测网密度提高到5.8个/1000 km^2 监测点。通过对国土面积内地下水监测,为政府实时提供信息和技术支撑的同时,对我国地下水资源优化配置、地下水环境改善、城市发展规划、生态环境保护、地质灾害预防、农业

结构调整、工业发展布局等具有战略性的指导意义。

据有关专家介绍,在18.31亿亩(122.07 km^2)国土耕地面积中,全部或部分依靠地下水灌溉的面积达40%左右,661个建制市中有400多个采用地下水源地进行城市供水。通过国家地下水监测可以及时获取地下水资源量和水质的变化数据,从而科学、合理地开发利用地下水资源,达到经济社会可持续目的。

3 监测井建设关键问题分析

国家地下水监测工程建设的绝大部分内容为钻井工程。如国土资源部建设的10103个地下水监测站点中,新建监测站点7235个,改建监测站点2868个。新建监测站点中,新施工监测井7197个,钻探总进尺共68.4万 m ,流量监测站点38个;改建监测站点中,改建监测井2809个,流量监测站点59个。因此,监测井的施工质量将直接影响着地下水监测效果和参数数据的真实性,是整个国家地下水监测工程实施效果的决定性因素。

近日,笔者在对国家地下水监测工程(河南省部分)5个标段设计书评审时发现存在设备配套、钻井工艺、成井材料等诸多常识性和技术性问题,在第一次评审中没有一家单位的设计通过评审。这些问题将会严重影响监测井的钻进效率、施工成本以及成井质量等,为此,笔者结合多年水文水井以及地下水监测井的研究成果和实践经验,对本次重大工程监测井建设的几个关键问题进行分析讨论,以期对钻探同行在该项目监测井的设计和施工中有所启示和借鉴。

3.1 施工组织管理问题

本次国家地下水监测井施工具有“规模大、战线长、地域广、地质条件复杂”等特点,涉及到施工队伍繁杂、钻探水平参差不齐、占地赔偿、搬迁频繁、道路交通安全等问题。在资金有限的情况下,怎样实现“高效、有序、安全、保质、协调”完成任务,是对每个施工组织单位的考验和检验。

仅从施工难度上来讲,监测井深度多数为50~80 m ,最大井深500 m 左右。目前国内大部分施工单位的设备能力和钻井水平都能够满足施工要求。虽然钻井深度浅,但战线长、造价低,频繁设备搬迁、占地协调和青苗赔偿是整个工程的主要工作内容之一,如果组织管理和协调(钻前准备)工作环节出现问题,将会影响项目的正常进展和延误工期,届时造

成整体项目的严重亏损。

从多数单位组织施工设计来看,有些成立项目指挥部或领导小组,分设钻探工程、水文地质、测绘组、物测组等几个专业小组;有些仅仅成立项目部对人员进行了简单分工;有些直接进行工程的转包或分包等。无论是否有指挥部还是项目部,存在的突出问题是:项目人员构成方面重形式,轻实效,有些是单位领导挂帅,有的是部门领导挂帅,把整个单位主要领导和技术人员全部罗列在项目组成人员中,实际上真正直接参与项目建设的也就几个人;专业结构方面,有非专业人员担任项目负责人的,也有其它专业或本专业人员担任项目负责人的,涉及专业广泛,甚至有的项目人员中没有一个探矿工程技术人员或相近专业人员。

3.2 钻井结构设计问题

3.2.1 钻井口径与井管规格匹配问题

国家地下水监测井施工技术要求浅井管径口径为168 mm 无缝钢管,钻井口径 ≥ 350 mm,同时强调在水质污染严重或腐蚀性强的地区使用PVC-U 塑料管。而目前我国成熟的PVC-U 塑料专用井管标准序列中没有相应规格。这样就造成设计钻井口径不统一的现象,有的设计口径350 mm,有的设计口径400 mm,而井管直径都是168 mm。下入 $\varnothing 168$ mm 井管,钻井口径设计350~400 mm,对于多数地层来说偏大,明显不合理,最终将导致成本高、效率低的问题。

3.2.2 过滤管安装位置及监测目的层问题

对于浅层松散地层地下水监测井(50~80 m)来说,过滤管安装位置可以根据含水层位置进行安装,其监测目的和数据准确度应该没有多大问题。而对于中深层地下水监测井(≥ 200 m)且地层上部为松散孔隙水、下部为基岩构造水,其上部松散地层是否也要下入过滤管?是达到地下混合水监测目的,还是监测基岩构造水?其要求中没有明确。所以,就出现了设计混乱问题,同时,将来会直接影响地下水监测数据准确性。

3.2.3 井深设计问题

监测井井深设计多数为50 m,从任务书和设计书看似问题不大。但是,近年来地下水超采、水位急剧下降和漏斗面积的逐步增加,有些地区地下水位已远远超过所设计的井深。特别是城市高层建筑基坑降水和常年干旱地区的地下水严重匮乏,即便

是新建监测井有少量地下水,出现不出水或出水不连续,甚至是干孔等情况,达不到抽水试验技术。是加深钻井,还是选择新的位置重新施工?其技术要求中也没有明确规定,若出现这些问题届时需要设计更改和审批,势必会造成不必要的麻烦和工程延期等问题。

3.3 成井管材选择问题

国家地下水监测井对成井管材的要求主要采用无缝钢管,对于地下水污染或潜在污染的地区和高矿化度地下水地区要求选用PVC-U 管材。但是,在评审施工单位的设计书中发现,所有的管材设计均为金属井管和镀锌桥式过滤管。出现这种现象主要是多数单位没有使用过PVC-U 管材,不了解其特性和下管工艺。所有的金属管材在地下水或潮湿地层中都存在腐蚀结垢问题,只是腐蚀结垢速度不同而已。地下水监测井不同于普通的供水井,其长期不流动循环更容易腐蚀结垢,从而堵塞过滤管。一旦结垢严重完全堵塞后,井管内外地下水不连通,其监测数据就不能准确反映实际情况和变化。

目前我国水文水井成井管材主要以普通钢管和镀锌桥式过滤管为主,PVC-U 塑料管只是近年来才开始使用。通过试验和大量的井下彩色电视监测发现:所有金属管井都同时存在着多种形式的腐蚀,单一的腐蚀类型和均匀腐蚀较少,腐蚀与结垢相互伴生,腐蚀产生结垢,结垢加速腐蚀,并且金属管材腐蚀后其强度急剧下降。其腐蚀类型主要有:溶解氧浓差腐蚀(水位上部和下部管材)、电偶腐蚀(同一介质中不同金属材料)、生物腐蚀(地层土壤中微生物)、缝隙腐蚀(结垢缝隙处)、应力腐蚀(井管焊接处和变径处)、磨损腐蚀(水流和固体物冲刷)和均匀腐蚀等。多数情况下在一口井中这几种腐蚀类型可以同时存在,起到了联合腐蚀的作用,从而加速金属井管的腐蚀与结垢,主要以局部腐蚀和穿孔的形式出现。

图1是部分金属和合金的电偶序(即标准电极电位)。

从图1中可以看出:不同的金属其标准电极电位值不同,在我国几乎所有的供水管井中使用的金属井管材料为20号钢,即含碳(C)量在0.17%~0.24%;有些200~300 m的供水井采用的井管为铸铁,其含碳(C)量 $> 2.06\%$;部分300~600 m的中深井采用球墨铸铁管,其含碳(C)量在3.8%~4.0%。

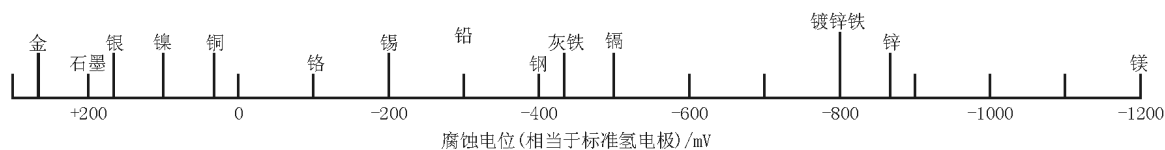
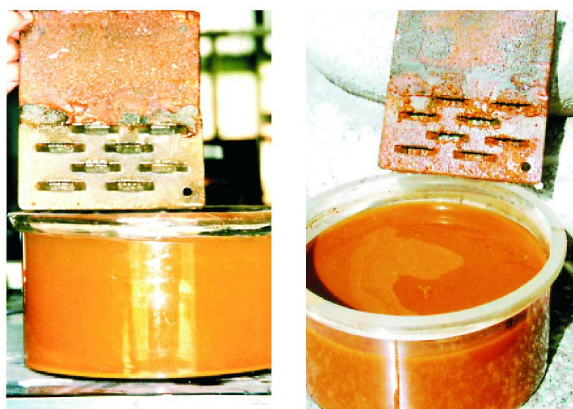


图1 部分金属和合金的电偶序(标准电极电位)

另外,所有的井管材料中还含有 Mn、S、P、N、Si 等杂质。图1中从左到右金属的活泼性依此增强。常用的镀锌过滤管和普通钢管联合使用和金属管井内下入不锈钢水泵等,由于其电极电位相差较大,并且在同一水介质中,从而形成了腐蚀电流,加速了金属井管的腐蚀与结垢。图2是普通金属井管和镀锌桥式过滤管在常温与同一地下水样中的挂片腐蚀结垢试验。试验60 d时普通钢管表层出现大量腐蚀产物,而镀锌桥式过滤管表面基本光滑,仅出现轻微锈斑。到90 d时普通钢管表层腐蚀产物剥落,而镀锌桥式过滤管则出现腐蚀结垢和堵塞现象。



(a) 60 d时腐蚀结垢情况

(b) 90 d时腐蚀结垢情况

图2 普通钢管—镀锌桥式管电偶腐蚀挂片试验

为了直观了解和观察不同过滤管材的腐蚀与结垢情况,我们把国内常用镀锌桥式过滤管、梯形丝碳钢过滤管、PVC-U 铰缝式过滤管和不锈钢梯形丝过滤管在实验室同一水环境和温度下进行腐蚀与结垢试验,如图3和图4所示。试验分2组进行,即:第1组试验是选择上述4种不同材质和不同类型的过滤管,在同一种类型的地下水中进行对比性试验;第2组试验是选择同种材料的PVC-U塑料过滤管在不同水质的地下水中进行对比试验。

通过试验可知:镀锌桥式过滤管,在第7 d时开始腐蚀与结垢,普通T型丝过滤器在第15 d时开始腐蚀结垢,但是其腐蚀结垢程度远小于镀锌桥式过滤器。PVC-U塑料和不锈钢过滤管则无变化,只是不锈钢容器内水质稍微浑浊,而塑料管容器内

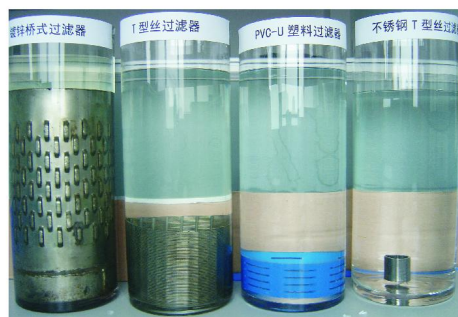


图3 不同材质腐蚀结垢试验



图4 PVC在不同水质中腐蚀结垢试验

水质依旧清澈透明。图5是试验进行到30 d时镀锌桥式过滤管腐蚀情况,可以看出管内外均腐蚀严重,且过滤缝隙处已出现结垢和堵塞情况。PVC-U塑料管则不存在腐蚀结垢和溶解现象。



(a) 浸水试验前镀锌过滤管



(b) 浸水30 d时腐蚀结垢情况

图5 常用镀锌桥式过滤管腐蚀试验

据陈莹,段隆臣等人研究成果显示:通过水井建设成本、维护和重建费用的分析,并建立技术经济评价模型,在一定评价期内考虑资金的时间价值,以终净值为最终经济评价指标评价不同成井管材的技术经济性。从长远角度考虑,PVC-U 井管的技术经济性要优于普通钢管、石油套管。不同水井井管材料寿命期和其维护费用情况参见表 1。

表 1 不同水井井管材料寿命期及其维护费用

井管类型	水井寿命/年	维 护 费 用
螺旋/无缝钢管	2~8	固定维护费用 500 元/年,2 年后每 1 年洗井一次,按 30000 元/次计算
石油套管	10~15	固定维护费用 500 元/年,2 年后每 2 年洗井一次,按 30000 元/次计算
PVC-U 井管	50	固定维护费用 500 元/年,因井管材料不腐蚀结垢无需额外洗井

注:固定维护费用指保证水井正常运行每年进行的定期检测费用。

所以,在整个国家地下水监测井工程中,成井管材的选择是一个重要问题,也是今后运行监测过程中涉及数据准确、使用寿命的关键环节。

表 2 郑州沿黄地下水源地钻井试验不同钻进工艺钻进效率对比

钻进工艺	钻机型号	井号	施工日期	施工时间/d	钻进深度/m	成井效率/(m·d ⁻¹)	平均成井速率/(m·d ⁻¹)
正循环钻进工艺	BQ-150	B6	2010-02-20—2010-03-03	12	108.30	9.03	6.82
		B17	2010-01-10—2010-02-01	23	107.75	4.68	
	CZ-150	A2	2010-01-19—2010-02-01	14	105.83	7.56	
		B16	2010-02-19—2010-03-04	14	107.75	7.70	
泵吸反循环钻进工艺	CBF-150	B14	2010-02-22—2010-02-27	6	108.65	18.11	31.96
		B13	2010-03-01—2010-03-03	3	109.10	36.37	
		A8	2010-03-03—2010-03-04	2	108.56	54.28	
		B11	2010-03-04—2010-03-07	4	109.04	27.26	
		B10	2010-03-08—2010-03-09	2	109.67	54.84	
		A7	2010-03-09—2010-03-11	3	109.34	36.45	
		A5	2010-03-15—2010-03-16	2	96.46	48.23	
		A3	2010-03-23—2010-03-25	3	107.06	35.69	
		B9	2010-03-25—2010-03-28	4	106.50	26.63	
A4	2010-03-28—2010-03-29	2	108.48	54.24			
B5	2010-03-29—2010-04-03	6	109.72	18.29			

3.4 钻进工艺选择问题

国家地下水监测工程建设相关技术要求中没有推荐和要求具体钻进方法或工艺,但是,钻进方法或工艺的选择将直接影响着监测井的质量和建设效率。特别是在细颗粒地层和裂隙不发育地层中钻进,若采用传统泥浆正循环钻进,势必造成钻井液污染和堵塞含水层,从而导致洗井困难,成井周期长等问题,严重者将不能体现水文地质参数的真实性。成井质量与钻进方法、钻井液类型、钻进时间、洗井方法等密切相关。所以,针对地质和水文地质条件选择合理的钻进工艺至关重要,通过钻探经济学理论和方法指导工程设计同样具有重要意义。

通过河南省地矿局第二地质环境调查院和河南省深部探矿工程技术研究中心联合在郑州沿黄地下水源地钻井试验表明:100 m 左右的浅井采用泵吸反循环钻进工艺比正循环钻进工艺钻进效率提高了 3~4 倍,单井出水量提高 30% 左右。如表 2 和图 6 所示。

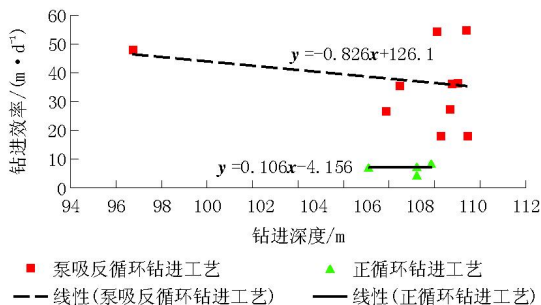


图 6 正循环钻进和泵吸反循环钻进效率趋势图

浆钻进和泵吸反循环钻进过程中钻进深度 x 与钻进效率 y 的关系式分别为(1)式和(2)式。

$$y = 0.106x - 4.156 \quad (1)$$

$$y = -0.826x + 126.1 \quad (2)$$

将(1)式、(2)式联立,得 $x = 139.8 \text{ m}$, $y = 10.6 \text{ m/d}$ 。即当钻进深度在 139.8 m 时,在该地区采用正循环钻进工艺和反循环钻进工艺其钻进效率相等,当钻进深度 $< 139.8 \text{ m}$ 时,泵吸反循环钻进工艺进行施工效率要高于正循环钻进工艺,当钻进深度

由图 6 中线性回归趋势线方程可知,正循环泥

>139.8 m时,泵吸反循环钻进工艺进行施工效率要低于正循环钻进工艺。

4 结论与建议

4.1 结论

(1)国家地下水监测工程实施意义重大,事关地质环境、饮水安全和经济社会的可持续发展等民生问题。

(2)钻探工程决定着国家地下水监测工程建设的质量、运行效果及使用寿命。严格材料质量和钻进方法选择具有一定的意义。

(3)项目组织、成井管材和钻进工艺选择是本次国家地下水监测工程关键问题。其中,PVC-U管材为最佳成井材料,对于浅井钻进泵吸反循环为最佳工艺。

4.2 建议

(1)组织管理方面,首先高度重视国家地下水监测工程的重要性和必要性,成立业务精、能力强的项目机构,做到统筹安排、分工明确、各负其责。杜绝名不副实、形式主义、以包代管的现象。

(2)针对实际中具体问题和设计变更,明确监测井的目的任务和各级管理部门权限、责任,不必强求井深和井径问题。只要按照相关国标、行业标准执行则可,重点要求成井质量、管材选择和目的层。避免过多的请示、审批手续,使项目有条不紊进行。

(3)建议在地层和水文地质条件允许的情况下,优先使用泵吸反循环、空气潜孔锤、气举反循环等钻进工艺,达到高质量、水文地质参数准确目的。对于不同井深和地层可按表3进行优先选择。

表3 不同地层最优钻进工艺选择

钻进工艺	适用地层	特 点
空气潜孔锤钻进	开孔基岩或覆盖层埋深 < 50 m,且地层含水少、较稳定地层;下部为较完整基岩地层、轻微漏失地层	效率高、开孔不需要水和泥浆材料
常规正循环泥浆+气举反循环“二合一”钻进	第四系、新近系覆盖松散地层较厚;下部地层漏失较为严重。适用于较软或中硬岩石	效率高、不需要洗井工序、水量大
冲击钻进	全孔为直径 > 100 mm 的卵石地层	成本低、成井率高
泵吸反循环钻进	深度 < 120 m 的松散地层	效率高,无需洗井

-U管材,对于地下水腐蚀结垢性较强的地区,严禁使用普通金属管材或重金属超标的塑料管材。

(5)建议项目组织单位、管理部门及监理等相关人员进一步熟悉和了解相关规范和有关技术要求。监测井施工涉及到的标准和规范主要有:《水文水井地质钻探规程》(DZ/T 0418—2014)、《地下水监测井建设规范》(DZ/T 0270—2014)、《水井用聚氯乙烯(PVC-U)管材》(CJ/T 308—2009)、《机井井管标准》(SL/T 154—2013)、《供水水文地质勘察规范》(GB 50027—2001)、《地下水监测站建设规范》(SL 360—2006)、《浅层地热能钻探技术规范》(DB41/T 1005—2015)等。

参考文献:

- [1] 张迪. 饮用水安全信息亟待公开[N]. 中国城市报, 2016-04-18.
- [2] 范宏喜. 国家地下水监测工程获批 将在三年内建设完成[EB/OL]. 2014-12-22. <http://www.cgs.gov.cn/gzdt/mtbb/28743.htm>.
- [3] 范宏喜. 开启地下水监测新纪元[N]. 中国国土资源报, 2015-12-10.
- [4] 卢予北, 王建华, 陈莹, 等. 空气潜孔锤在松散地层中的钻进试验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(7): 9-11, 27.
- [5] 卢予北, 吴焯, 陈莹. 浅层地热能水源井工程问题与技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(8): 1-5.
- [6] 卢予北. 国家级一孔多层地下水示范监测井钻探技术与研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(3): 5-8.
- [7] 潘德元. 多通道地下水监测技术应用示范[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(11): 1-4.
- [8] 卢予北, 蒋国盛. PVC-U塑料管水井成井技术应用研究[M]. 湖北: 中国地质大学出版社, 2013: 17-99.
- [9] 吴焯, 卢予北, 李义连, 等. 浅层地热能开发的地质环境问题及关键技术研究[M]. 湖北武汉: 中国地质大学出版社, 2015: 47-98.
- [10] CHEN Ying, DUAN Longchen, LU Yubei, et al. Drilling Efficiency and Cost for Different Drill Technology in Loose Stratum[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 20(9): 3999-4010.
- [11] 陈莹, 吴焯, 段隆臣. 基于技术经济评价的水文水井管材选择[J]. 水电能源科学, 2013, 31(3): 149-152.
- [12] CHEN Ying, DUAN Longchen, LU Yubei. Technical and Economic Evaluation for Wire-line Coring in Large Diameter Deep Drilling Project in Salt Basin[C]// Elsevier Ltd., 2014, 73: 63-70.
- [13] 卢予北. PVC-U塑料管水井成井技术应用研究[D]. 湖北武汉: 中国地质大学, 2012.

(4)推荐所有监测井管材选择符合要求的PVC