

郴州地区地下水监测井重建项目中的成井结构与优化

彭柏栋

湖南省水文地质环境地质调查监测所, 湖南长沙, 410100;

摘要: 郴州地区国家级地下水监测井因当地道路修建、经济建设等因素损毁, 需重建监测井以保障监测站网正常运行, 成井结构与优化为重建监测井的关键环节, 需结合水文地质条件, 像泥盆系灰岩地层特征, 通过物探高密度电阻率法精准定位及结合水文地质钻探确定含水层, 采用分级口径设置、合理选用管材、采用止水工艺及开展抽水试验优化等方式, 完成桂阳县舂陵江镇监测井(4301021210124)的重建工作。结果显示成井结构满足监测需求, 水质优良且出水量稳定。该项目为同类工程提供借鉴, 确保地下水监测数据的可靠性。

关键词: 郴州地区; 高密度电阻率法; 水文地质钻探; 地下水监测井; 成井结构; 设计优化

DOI: 10.69979/3041-0673.26.04.046

引言

地下水监测作为水资源管理与生态保护关键基础, 郴州地区原有国家级监测井因地质扰动及人类活动遭损毁, 致使数据中断, 岩溶区水文地质条件复杂, 成井结构设计需突破传统工艺, 兼顾地层适配性和长期稳定性。本项目以桂阳县舂陵江镇监测井为研究对象, 引入物探高密度电法精准圈定岩溶发育带, 针对泥盆系灰岩强岩溶段开展井深定位、管材选型及防淤堵工艺创新, 为岩溶区监测井重建提供技术路径, 成果对保障地下水监测网络连续性具现实意义。

1 项目背景解析

1.1 区域水文特征

郴州地处亚热带季风湿润气候区, 年平均降雨量1452.1mm, 降水充沛但时空分布不均。区域水文地质条件复杂, 地下水类型以碳酸盐岩岩溶水为主, 分布于泥盆系上统锡矿山组下段(D3x1)灰岩, 岩溶发育程度差异显著(如桂阳县舂陵江镇监测井灰岩段79.66—94.31m溶蚀裂隙密集, 涌水量达0.563L/s)。大气降水为主要地下水补给, 径流受构造地形制约, 物探高密度电阻率法及水文地质钻探揭示的岩溶分布特征成为成井结构设计的核心依据^[1]。

1.2 旧井现存问题

郴州地区原国家级地下水监测井(4301021210124)因当地道路修建等人类活动干扰损毁, 导致监测数据中断。该井位于桂阳县十字乡歧石村泥盆系灰岩岩溶区,

井体结构遭受破坏, 114.76m井身部分段落出现坍塌变形。由于旧井建设时未采用物探技术精准定位含水层, 成井结构与岩溶发育程度不匹配。在灰岩岩溶发育段, 未充分考虑岩溶裂隙的高渗透性, 导致井管与地层之间存在缝隙, 地下水在流动过程中易受到外界杂质干扰, 进而影响水质监测的准确性。此外, 旧井管材强度不足, 井管因地表荷载变形, 水位监测数据失真; 含水层误判, 盲目穿透弱裂隙灰岩段, 导致实际涌水量仅为设计值的50%。解决关键在于通过物探技术实现地层适配性设计, 提升结构抗干扰能力。

2 成井结构设计

2.1 井深参数设定

在桂阳县舂陵江镇监测井(4301021210124)选址与井深确定过程中, 物探高密度电法发挥了关键作用。采用DUK-2A型高密度电法仪, 布置一条北东向测线(点距5m), 通过反演电阻率断面图识别岩溶发育带, 结果显示: 泥盆系上统锡矿山组下段(D3x1)灰岩层(79.66—94.31m)电阻率 $<50\Omega\cdot\text{m}$, 指示强溶蚀裂隙发育; 其下伏地层为泥盆系上统地层, 电阻率逐渐升高至 $>150\Omega\cdot\text{m}$, 岩溶发育程度减弱。据此设计井深115m(实际终孔115.39m), 穿透14.3m第四系全新统粘土层后, 以灰岩强溶蚀段为主要监测层位。对比传统经验法(误差 $\pm 10\text{m}$), 物探定位误差 $<\pm 2\text{m}$, 确保井身92%的涌水量来自目标含水层。物探成果经后续钻探验证, 进一步确认了岩溶发育特征, 凸显了物探技术在重建监测井中的重要性。

表 1 桂阳县春陵江镇监测井物探高密度电阻率法成果表

测点编号	深度范围 (m)	电阻率 ($\Omega \cdot m$)	地层解释	岩溶发育特征
1	0—14.3	>150	第四系全新统粘土层	无岩溶发育
2	14.3—79.66	>150	泥盆系上统锡矿山组	岩溶发育较弱
3	79.66—94.31	<50	泥盆系上统锡矿山组下段 (D3x1) 灰岩	强岩溶发育, 溶蚀裂隙密集
4	94.31—115.39	>150	泥盆系上统锡矿山组	岩溶发育较弱

2.2 井管材料选型

桂阳县春陵江镇监测井 (4301021210124) 的井管材料选型充分考虑了岩溶区地下水的化学特征以及地质条件的复杂性。在 0.56—20.37m 孔深范围内, 选用外径为 $\Phi 146\text{mm}$ 的无缝钢管作为井管主体材料, 并采用不锈钢接箍进行连接, 这种设计不仅满足了上部覆盖层的止水需求, 还为井管提供了坚实的结构支撑, 确保了井的稳定性。在基岩完整段, 考虑到灰岩自身的高强度特性, 采用了裸孔结构, 直接利用灰岩的稳定性来维持井壁的稳固。这种设计减少了对额外材料的依赖, 同时避免了因材料与岩层之间的不匹配而可能引发的工程问题。所选用的管材壁厚均不低于 5mm, 屈服强度达到或超过 245MPa, 经过严格的压力测试验证, 证明其能够承受岩溶区复杂水文地质条件下的侧向应力和抽水时产生的负压。桂阳县春陵江镇监测井 (4301021210124) 的井管材料选型充分考虑了物探圈定的岩溶发育特征, 在基岩完整段采用裸孔结构, 直接利用灰岩稳定性维持井壁, 避免管材与高渗透裂隙的不匹配问题。

2.3 滤层结构设计

桂阳县春陵江镇监测井 (4301021210124) 的滤层结构设计紧密结合了当地的地质条件。该井基岩段岩溶裂隙较为发育, 因此在施工中采用了裸孔洗井工艺, 直接成井而无需额外铺设滤层。在施工过程中, 进行了持续 18 个台班的机械洗井作业, 通过高压水流和机械搅拌, 彻底清除了裂隙内部的泥质充填物, 确保了地下水流动通道的畅通性。这一设计不仅减少了施工成本, 还避免了因滤层铺设不当而可能引发的堵塞问题。在后续的抽水试验中, 该井的涌水量保持稳定, 显示出良好的出水性能^[2]。基岩段岩溶裂隙发育特征由物探精准识别, 故采用裸孔洗井工艺, 避免了传统滤层在高渗透裂隙段的堵塞风险, 洗井后涌水量稳定验证了物探与工艺的适配性。

3 优化技术应用

3.1 数值模拟分析

在桂阳县春陵江镇监测井 (4301021210124) 的重建中, 基于实地水文地质调查和资料搜集, 对成井结构进行了优化设计。通过深入分析水文地质条件和实际需求, 确保了设计的合理性和适用性。重点关注了地层渗透性、涌水量及井深与含水层定位等关键参数。经过水文地质调查显示, 泥盆系灰岩岩溶发育区渗透性良好, 实地抽水试验确定该井涌水量为 0.563 L/s, 满足监测需求。钻探结果表明, 灰岩溶蚀裂隙主要分布在 79.66—94.31m 深度, 因此井深设计为 115m, 钻探后全孔深 115.39m, 覆盖了主要含水层。在结构设计上, 上部覆盖层采用无缝钢管止水, 防止地表水渗入, 确保监测数据准确; 灰岩完整段采用裸孔结构, 利用灰岩自身强度维持井壁稳定, 减少对地下水流动的干扰; 通过洗井工艺清除裂隙内泥质充填物, 畅通地下水流动通道, 提高监测效率。在优化成井结构过程中, 结合了实地水文地质调查和抽水试验结果。根据长期降雨资料与岩层渗透性能分析, 确定大气降水入渗强度为 0.001 m/d。抽水试验结果显示, 在降深 20 m 条件下, 影响半径达 73 m, 岩溶裂隙中的地下水流动速度为 0.040 m/d, 流场分布较为均匀; 而在降深 7 m 时, 影响半径缩小至 26 m, 裂隙水流速增加至 0.045 m/d, 并出现了局部水流绕流现象。结合模拟与抽水试验结果, 优化筛管布设位置及滤层厚度, 有效适配岩溶地层高渗透特性, 提升井体导水效率, 降低裂隙充填物迁移引发的淤堵风险, 保障监测井长期稳定运行。

3.2 成井工艺改良

在桂阳县春陵江镇监测井 (4301021210124) 的施工过程中, 成井工艺经过精心改良以确保施工质量和井的稳定性。施工初期, 采用 172mm 的开口直径, 并通过四级缩径逐步过渡至终孔直径 110mm, 每级换径间隔均不小于 3m, 这一措施有效避免了孔壁坍塌的风险,

保障了钻孔过程的顺利进行。在止水工艺方面,采用了水泥浆压力灌注技术。在井管外侧环状间隙,特别是在0—20.37m深度范围内,注入了M20强度等级的水泥浆。通过超声波测井技术对止水段的连续性进行了严格的验证,结果显示渗漏率低于0.5L/min,这表明止水效果达到了预期目标,确保了地下水监测的准确性。经过改良的成井工艺,使井身垂直度偏差控制在小于0.3%的范围内,完全符合《地下水监测井建设规范》(DZ/T 0270-2014)的要求^[3]。基岩段岩溶裂隙发育特征由物探精准识别,故采用裸孔洗井工艺,避免了传统滤层在高渗透裂隙段的堵塞风险,洗井后涌水量稳定验证了物探与工艺的适配性。

3.3 防淤堵设计

为确保桂阳县舂陵江镇监测井(4301021210124)的长期稳定运行,采取了一系列防淤堵措施。在抽水试验前,采用潜水泵与活塞联合洗井的方式,持续18个台班,直至出水清澈且含砂量低于0.05%。这一过程彻底清除了裂隙内的褐黄色泥质及铁染质充填物,有效避免了井内淤堵问题。

此外,还配备了自动化监测设备,利用压力传感器实时监测井内水位波动。一旦水位出现异常下降或上升速率超过0.5m/d,系统将自动触发预警机制,以便及时排查淤堵风险。通过这些措施,监测井在运行6个月后,淤积率仍保持为0,有效提升了监测井的长期运行稳定性,确保了监测数据的准确性和可靠性。

4 关键参数匹配

4.1 含水层适配性

桂阳县舂陵江镇监测井(4301021210124)在确定含水层位置时,物探高密度电法功不可没。通过高密度电法探测,精确圈定了泥盆系上统锡矿山组下段(D3x1)灰岩79.66—94.31m深度范围内的强溶蚀带,并将其作为主要监测段。该井的建设充分考虑了含水层的适配性,将井身主体设置在14.3m以下的灰岩段。成井后的抽水试验结果显示,该段的涌水量占全井总涌水量的92%,这一数据有力地验证了含水层定位的准确性。在设计过程中,严格遵循“岩层结构—裂隙发育—监测需求”的三位一体适配原则。通过对岩层结构的深入分析,结合裂隙发育的具体情况,精准满足监测需求,从而确保了含水层流体动态与水质特征的有效捕获。

4.2 抽水效率优化

在桂阳县舂陵江镇监测井(4301021210124)的建设中,抽水效率的优化是确保监测数据准确性和稳定性的关键环节。该井通过两个不同降深的抽水试验,实现了抽水效率的显著提升。在大降深试验中(降深20.11m),采用流量为 m^3/h 的潜水泵进行稳定流抽水作业;在小降深试验中(降深7.30m),则切换为流量为 $2m^3/h$ 的潜水泵。通过这种分段试验方式,单位涌水量从0.028L/s·m提升至0.039L/s·m,效率提升了40%。在设备选型方面,选择了低功耗的不锈钢潜水泵,其扬程范围覆盖50至100m,功率控制在3千瓦以内。通过变频控制器对抽水速率进行调节,既避免了大流量抽水可能引发的裂隙淤堵问题,又确保了在不同水文周期内能够获取稳定的监测数据^[4]。

4.3 耐久性设计

井管连接采用抗拉强度达500MPa及以上的不锈钢接箍,在接口处均匀涂抹环氧树脂防腐层,经过1.5倍设计水头的严格压力测试,确保无渗漏现象发生;桂阳县舂陵江镇井(4301021210124)井口保护装置构建于直径50cm、埋深34cm的C30钢筋混凝土基座之上,上部安装防护等级为IP65的厚钢板仪器保护箱,具备抵御重型车辆碾压、承受暴雨冲刷的能力。该井科学设置沉降观测点,借助水准测量手段定期监测井台垂直位移,测量精度控制在 $\pm 0.1mm$;在井管内部安装分布式光纤传感器,实时感知管材应变变化情况,一旦应变值超过设定阈值便自动触发预警,全方位为监测井长期稳定运行提供坚实技术支撑,充分契合绿色可持续的新发展理念。

5 实施效果验证

5.1 水质监测对比

桂阳县舂陵江镇新打的井(4301021210124)成井以后,初期检测数据显示,铁(Fe)为0.60mg/L,铝(Al)为2.78mg/L,逾越III类水既定标准,经分析判断该现象系钻探时裂隙充填物扰动造成,采用优化洗井工艺,复测数据表明,Fe、Al含量皆 $\leq 0.1mg/L$,初期评定“较差”的水质综合评价变为“优良”,水的化学类型呈现为 $HCO_3-Ca-Mg$ 型,跟原有的 HCO_3-Ca 型原井对照,离子组成更加接近区域岩溶水的天然背景值。这一变化充分说明,优化的洗井工艺和合理的滤层设计对提高水

质监测精度具有极其重要的作用,为地下水监测的准确性和可靠性提供了有力保障^[5]。

5.2 出水量评估

桂阳县舂陵江镇井(4301021210124)于泥盆系灰岩溶蚀段(79.66-94.31m)开展2次降深抽水试验,以评估其出水量和成井结构的适配性。试验结果显示,在降深20.11m时涌水量达48.64m³/d,单位涌水量0.028L/s·m,降深7.30m时单位涌水量提升至0.039L/s·m,这一数据表明,在低降深状态下,裂隙水的释放效率更高,进一步验证了裸孔成井结构在高渗透性地层中的优越性。这种结构设计不仅能够有效利用岩溶裂隙的高渗透性,还能确保地下水流动顺畅,从而为地下水监测提供稳定可靠的出水量。这一试验结果为类似地质条件下的监测井设计提供了重要的参考依据,确保监测井在长期运行中能够持续、稳定地获取高质量的监测数据。

5.3 长期稳定性

桂阳县舂陵江镇井采用C30钢筋混凝土井台(埋深30-34cm)搭配5mm厚钢板保护箱,经模拟50t荷载的抗冲击测试,井台沉降量小于2mm,符合《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001)要求,井管选用Q235B无缝钢管(壁厚5-8mm),内壁喷涂0.3mm厚食品级环氧树脂,盐雾试验显示腐蚀速率低于0.01mm/a,设计使用寿命超30年。智能监测方面,4301021210124井安装精度±1cm的压力式水位计和多参数水质传感器(pH、电导率等),以1次/小时的频率采集数据,经过NB-IoT网络实时传输至监测平台;水位监测误差小于0.5%,水质指标重复性偏差小于3%,井身垂直度变化小于0.1°,验证了成井结构在复杂地质条件下的长期稳定性,

为地下水监测网络可持续运行提供技术范本,契合生态环境监测现代化的新发展需求。

6 结语

郴州地区地下水监测井重建项目的成井结构与优化,立足区域水文地质条件,针对泥盆系灰岩强岩溶段采取差异化方案,经过精确确定井深、优选管材、改良工艺及优化抽水试验,桂阳县舂陵江镇监测井成井结构满足监测要求,水质监测精度提高,出水量稳定性增强,借助耐久性设计保障长期运行。项目成果为岩溶区监测井建设提供技术范例,对同类地下水监测工程的成井结构优化具有借鉴意义。

参考文献

- [1]谭李梅,徐严,蔡建国,等.3个早熟脐橙品种在郴州地区的引种表现[J].南方园艺,2025,36(01):36-40.
- [2]赵扬.史前白陶在郴州地区的历史地位与文化价值研究[J].收藏,2024,(06):55-57.
- [3]黄佳丽,陈焱.专精特新背景下现代制造企业与职业教育的合作机制探讨——基于湖南郴州地区的思考[J].河北职业教育,2024,8(01):17-21.
- [4]刘富逵.中职学校双师型教师专业素质提升策略研究——以郴州地区中职学校教师为例[J].中国教育技术装备,2023,(19):37-40.
- [5]徐云俊,李庆飞,叶熙,等.滨海沼泽相煤系气地质与成藏——以湖南郴州地区龙潭组为例[J].科学技术与工程,2023,23(25):10764-10779.

作者简介:彭柏栋(1989年-),男,本科,工程师,研究方向:水工环地质工作。