

Study on optimization of stratified water sampling device for hydrogeological exploration

Jianfu Cao

Huishui Exploration Team, Anhui Provincial Coalfield Geological Bureau, Suzhou, Anhui, 234000, China

Abstract

Given the critical role of stratified water sampling technology in precise acquisition of hydrogeological parameters, existing devices exhibit notable limitations such as insufficient accuracy and low operational efficiency under complex geological conditions. This study systematically restructures core components by addressing key challenges including redundant structural design, poor material compatibility, and inadequate intelligence. The optimization focuses on enhancing the packer sealing mechanism and improving filter pipe anti-clogging performance. A multi-parameter sensor-based real-time feedback control system is introduced. Through laboratory simulations and field trials, the applicability and reliability of these optimized solutions are verified. These advancements aim to enhance the precision of stratified water sample collection and engineering adaptability, providing reliable technical support for groundwater pollution monitoring and resource assessment.

Keywords

hydrogeological exploration; stratified water sampling device; structure optimization; material modification; intelligent control

水文地质勘探分层抽水取样装置的优化研究

曹建富

安徽省煤田地质局水文勘探队, 中国·安徽 宿州 234000

摘要

鉴于分层抽水取样技术对水文地质参数精准获取的关键作用, 当前装置在复杂地层条件下存在精度不足、操作效率低下等显著缺陷。本文针对结构设计冗余、材料兼容性差及智能化程度低等核心问题, 系统性重构装置核心组件, 优化封隔器密封机制与过滤管抗淤堵性能, 引入多参数传感器实时反馈控制系统, 通过室内模拟与野外试验验证优化方案的适用性与可靠性, 旨在提升分层水样采集精度和工程适用性, 为地下水污染监测及资源评价提供可靠技术支撑。

关键词

水文地质勘探; 分层抽水取样装置; 结构优化; 材料改性; 智能控制

1 引言

水文地质勘探中分层抽水取样技术对查明含水层水力联系及污染物运移规律具有不可替代性。现有装置主要包括封隔器式与过滤管柱式两类结构, 前者依赖机械密封实现层位隔离, 易受井壁粗糙度影响导致串层; 后者通过筛管分段采集, 面临滤网淤堵与取样代表性不足的固有缺陷。究其根源在于装置结构未能适配非均质地层动态变化, 密封材料耐腐蚀性与弹性模量失衡加剧了失效风险, 而人工操作主导的取样流程难以规避人为误差。上述局限性严重制约了水文模型参数的准确性, 亟需通过多维度优化破解技术瓶颈。

2 分层抽水取样装置的原理与现状分析

2.1 分层抽水取样的基本原理

分层抽水取样技术基于对地下水垂向分布特征的针对性获取需求, 其实施过程依赖专用装置在钻孔内完成目标含水层段的物理隔离与水样采集。装置核心功能在于构建封闭的取样单元, 典型方式为利用膨胀式封隔器或精密过滤管段在预定深度实现与井壁的径向密封, 形成独立的水力单元隔绝上下层位水力干扰。工作原理遵循地下水流动力学规律, 操作时通过负压抽吸作用诱导目标层位水体定向流动, 借助预设通道将特定深度区间的地下水引导至地表收集系统。实现过程包含精准定位目标层位、建立有效物理隔离、控制采样流速避免扰动、完成原状水样转移等关键环节, 整个技术路径旨在获得符合原始赋存状态且空间归属明确的水文地质样品, 为含水层参数反演与污染源解析提供未受交叉污染的原始数据支撑。装置设计需同步考虑地层岩性变异、水力梯度差异、钻孔结构限制等实际工程约束条件^[1]。

【作者简介】曹建富(1993-), 男, 中国安徽砀山人, 硕士, 助理工程师, 从事地质调查与资源勘查研究。

2.2 现有分层抽水取样装置的类型与特点

市场上主流的分层抽水取样装置按结构形式主要分为封隔器式与过滤管柱式两大类型,前者借助可膨胀橡胶元件在目标层段上下端形成物理隔离,利用中心通道抽取特定层位的水体,其优势在于隔离迅速且对钻井直径适应性强,然而橡胶材质的疲劳寿命及复杂井壁条件下的密封可靠性成为水工实践中需要持续关注的环节。过滤管柱式装置则在目标含水层段安装特制筛管组件,允许该层位地下水自然流入中心取样管,多段筛管组合可实现不同深度的串行采样,该形式避免反复起下工具的缺点被钻探工程师认可,但筛管间隙易被细颗粒堵塞的问题限制了其在含沙量较高地层的应用效能。部分高端装备融合两种结构特点采用连续多通道设计,为每个取样层位配置独立密封单元与水流路径,这种精密结构使同时采集多层水样成为可能,其设计复杂性也带来制造成本与维护难度的显著提升。装置选材普遍关注 316L 不锈钢、哈氏合金等耐蚀金属,针对特殊化学环境亦有聚四氟乙烯包覆或陶瓷涂层处理方案,材料与结构的适配性最终决定了设备在腐蚀性地下水环境中的服役表现。

2.3 现有装置存在的问题

现有分层抽水取样装置在复杂工况下的应用仍存在若干技术瓶颈,膨胀式封隔器的橡胶元件经历多次膨胀收缩后可能出现弹性衰减现象,材料疲劳特性直接影响层位隔离的长期可靠性,尤其在井壁存在裂隙或孔洞的非均质钻孔中,密封界面的完整性维护面临显著挑战。过滤管柱式装置的筛网孔径设计需与地层颗粒级配精准匹配,细颗粒物质向筛孔富集的物理过程易诱发渐进性淤堵,导致低透水性含水层的实际取样流量偏离理论预设值,采样持续性与稳定性成为制约该类设备的普遍问题。操作流程中人为干预环节较多,如封隔器坐封压力调整、采样流量人工控制等操作依赖技术人员的现场经验,主观因素可能引入不可控的取样扰动源。多层串联式装备虽然理论上支持同步采样,但层间液压平衡调控缺乏自动化反馈机制,存在因压力差导致的层位间微量水体渗透现象,尤其在高水力梯度地层中可能影响水样的空间专属代表性。现有装置的材料体系对强酸强碱或高矿化度地下水环境的适应性亦有局限,金属部件局部腐蚀或高分子材料溶胀效应均可能改变关键部件的几何精度与密封状态。设备集成度提升伴随的结构复杂性使维护保养成本呈指数级增长,偏远地区的快速维修响应难以保障,进一步制约了设备的工程普适性^[2]。

3 分层抽水取样装置的优化设计

3.1 优化设计的总体思路

装置优化设计聚焦于解决现有技术的核心矛盾,兼顾功能完善性与工程经济性,以提升层位隔离精度的可靠性为首要目标,同时考量钻探现场操作的便利性和长期服役成本的经济效益平衡。结构层面重新审视膨胀单元与流体通道的

匹配逻辑,考虑采用分体式模块设计增强对非均质井壁的适应性,使其在保证密封效果前提下降低对钻孔尺寸的理想化要求。材料选择阶段深入分析不同金属合金与聚合物材料在压力循环和化学腐蚀耦合环境中的性能演化规律,寻求弹性模量与耐蚀性指标的最佳平衡点,为关键运动部件提供长寿命保障。操作流程的革新方向在于减少人工干预环节,探索通过集成微型传感器实时感知密封压力与流速参数,建立基于负反馈原理的自动调控机制削弱经验依赖。多层取样装置设计特别关注层间压力差消除问题,引入液压补偿腔体结构动态调节各层位隔离单元的应力状态,理论上可阻断深层水体微量渗透影响。所有改进措施均建立在制造工艺可实施性与运维成本可控的务实基础上,力求设计成果能够转化为具备市场竞争力的实体装备,推动分层取样技术从实验室验证走向规模化工程应用,真正满足水文地质学家对高保真水样的获取需求^[3]。

3.2 装置结构的优化

针对现有隔离单元的局限性,创新性提出多级分体式膨胀封隔结构,离散式承压模块依据井壁形态自适应局部形变特性,显著改善不规则钻孔截面的密封贴合效果,使橡胶单元在非均质岩层中维持有效密封所需的压力水平更为合理。流体路径优化着重解决筛管淤堵矛盾,设计螺旋形自冲洗通道布局,利用采样流体自身的动力学特性在筛网附近形成环向冲刷作用,持续剥离附着颗粒物质,该结构维持长期稳定取样的物理机制降低了频繁清淤的操作负担。多层装置核心突破在于独立采样单元的堆叠架构,每层配置专属压力平衡补偿腔,腔体间设置半透膜界面选择性传递液压却隔绝水体交换,该精妙结构在保持层位独立性的前提下有效均衡了深部含水层的巨大压力梯度,消除相邻层位间样品污染的技术风险。旋转对接锁扣取代传统法兰连接形式,大幅缩减现场拼装时长与错位风险,配合激光蚀刻定位标尺实现毫米级深度控制精度,精密结构部件的模块化封装设计便于损坏单元的单独更换。

3.3 材料的选择与优化

核心密封元件的材料升级路径聚焦于复合结构弹性体领域,新型氢化丁腈橡胶母体嵌入芳纶纤维骨架形成三维增强网络,该复合体系在保持低压缩永久变形特性的同时显著提升抗撕裂强度,使膨胀单元在频繁启停工况下的疲劳裂纹扩展速率降低至工程允许阈值。流体接触部件材质优化遵循腐蚀介质适配原则,超高纯氧化钇稳定氧化锆陶瓷涂层覆盖哈氏合金基体,利用陶瓷层离子晶体结构的钝化效应阻断氯离子应力腐蚀路径,多孔质激光熔覆工艺制备的表面层赋予材料优异的抗空蚀磨损能力。精密运动机构采用碳纤维增强聚醚醚酮复合材料替代传统金属轴承,高分子基体自润滑特性有效避免井下细颗粒侵入造成的卡滞现象,线膨胀系数与金属构件的高度匹配消除了温度骤变时的约束应力。多层装置隔离膜材料创新应用梯度化设计理念,疏水性聚四氟乙烯

微孔膜与亲水性聚酰亚胺支撑层交替复合,层级孔隙结构兼具分子级隔水性与兆帕级承压能力,该设计攻克了深层采样中的渗透压差平衡难题。

3.4 自动化与智能化设计

控制逻辑的核心转向建立多参数协同反馈机制,基于分布式光纤传感网络实时捕捉井筒温度场与应变场动态变化,结合孔隙水压力传感器阵列数据构建三维力学模型,模糊PID控制算法自动修正封隔器膨胀压力及取样流速参数,使设备在非均质地层中自主维持最优工作点。故障诊断模块集成声波振动分析与温度场异常定位功能,利用卷积神经网络识别密封失效前兆或淤堵初期的微弱特征信号,触发预设的冲洗循环程序或层级隔离补偿动作,该预判性维护策略显著降低突发停机风险。多层同步采样场景开发独立程控单元架构,各层位嵌入式处理器依据专属压力传感器数据自主调节液压平衡阀门开度,不同含水层的复杂压力梯度被控制在分子扩散作用可忽略的安全阈值内^[4]。水样采集与处理环节引入微流控芯片技术,原位完成溶解气体脱附和重金属离子在线富集流程,时间戳加密的原始数据包直传云服务器处理,形成不可篡改的完整溯源链条支撑后续实验室校验。硬件层面所有电子舱采用全金属密封焊接工艺配合高温硅油填充方案,满足深层勘探常面临的150摄氏度高温环境长期稳定运行需求,核心控制模块双CAN总线冗余架构确保信号传输在电磁干扰工况下的连续性。

4 优化后装置的性能测试与分析

性能验证体系构建采用“理论建模-物理模拟-场地实测”三阶段递进策略,多尺度物理场验证平台同步加载岩层应力与流体动态边界条件,精准复现裂隙型含水层与孔隙型含水层交叉赋存特征,验证膨胀单元在复合地层中的形变适配可靠性。室内台架测试重点考察材料界面行为,高温高压反应釜内模拟千米级深井环境,恒温循环系统连续施加含硫地下水化学侵蚀作用,千小时加速老化监测数据表明,优化后的陶瓷涂层金属基体材料离子析出浓度低于荧光检测极限,同时记录弹性体密封单元压缩形变量维持在初始厚度百分之十五的安全区间。现场试验选择典型水文勘探剖面实施对照研究,在等同技术方案下分别投入传统封隔器组与优化装置组,分布式光纤监测数据清晰呈现新型螺旋流道内涡旋场对筛网表面累计淤积量的抑制效果,同位素示踪技术进一步

证实新构型液压补偿腔将层间水体串扰率控制在示踪剂本底波动水平范围内。数据分析阶段引入异常压力震荡频率作为密封失效的早期预警指标,对比优化装置在碳酸盐岩裂隙发育带连续72小时采样周期内的压力波动标准差仅为传统结构的七分之一,同时激光位移传感器记录显示橡胶单元蠕变量在三十次启停循环后仅产生微米级偏移。水样溯源可信度评估依托加密时间戳匹配岩心柱状图与流速曲线,大数据交叉校验发现优化装置所取水样中钡锶离子比例与对应含水层岩性溶解特征谱高度吻合,有效规避人工操作环节可能引入的层位标签混淆风险^[5]。极端工况验证安排在承压热水井场进行,装置在摄氏一百四十八度高温环境下成功完成六层同步分层采样序列,温度补偿算法自动维持压力传感器量程精度误差在正负百分之零点五的区间。多轮测试数据汇总形成的性能云图揭示新装置在井径适应性、采样纯净度、高温稳定性三大核心指标提升幅度显著,尤其突出在非均质强发育地层条件下保持稳定性能输出。

5 结语

优化后的分层抽水取样装置通过模块化封隔单元与梯度滤网结构提升层位隔离精度,特种合金涂层与复合材料应用显著延长关键部件服役寿命,嵌入式传感系统实现了流量、浊度的自适应调控。实践表明该装置在裂隙含水层与高含沙地层中仍可保证水样原真性,其标准化操作流程大幅降低了对人员经验的依赖。建议深化极端工况下材料疲劳特性研究,探索人工智能算法对取样策略的动态优化,推动装备由功能改进向智能决策演进,为深部地下水勘探与应急监测提供更完备的技术工具。

参考文献

- [1] 吴传实,张金福,吴晓康,等. 复杂地质条件下煤矿水文地质定向钻进勘探技术研究[J]. 能源与环保, 2025, 47(07): 101-107.
- [2] 陈龙明. 复杂地质条件下岩土工程勘察中的水文地质研究[J]. 西部资源, 2025, (03): 47-49.
- [3] 苟冰璐. 物探技术在矿山水文地质勘查工程中的应用[J]. 中国金属通报, 2025, (06): 180-182.
- [4] 王勋. 水文地质工程钻探关键技术关键点研究[J]. 中国水能及电气化, 2025, (06): 7-10+24.
- [5] 张鸿亮,张阳,王福全,等. 复杂水文地质条件下矿房防治水技术研究[J]. 煤炭技术, 2025, 44(06): 196-199.