

## 井下机器人探测技术在废弃矿井水文地质勘察中的应用

张搏<sup>1,\*</sup>, 靳成才<sup>1</sup>, 洪名伟<sup>1</sup>

1. 辽宁有色勘察研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳, 110013

**摘要:** 针对废弃矿井水下勘察环境复杂、传统技术安全风险高、探测精度不足等问题, 以本溪市南芬区下马塘镇金家硫化铁矿综合治理项目为工程实例, 将河豚IV-A小型缆控水下机器人探测技术应用于废弃矿井水文地质勘察工作。本文阐述了机器人设备选型依据及核心技术参数, 系统梳理了探测前期准备、现场作业、数据处理的全流程, 分析了机器人探测在巷道涌水特征、污染溯源等方面的勘察成果, 并对比了该技术与传统勘察手段的应用差异。结果表明, 河豚IV-A水下机器人可完成废弃矿井水下2333m井巷的全覆盖探测, 精准查明巷道空间结构三维形态及矿井涌水规律, 同时实现水下关键点位水土定点取样, 为矿山综合治理提供高精度水文地质数据。井下机器人探测技术实现了废弃矿井勘察的无人化作业, 弥补了传统技术在隐蔽区域探测、水下取样等方面的不足, 提升了勘察工作的安全性、精准性和效率。本文分析了技术应用中存在的问题并提出优化对策, 为该技术在同类废弃矿山水文地质勘察中的推广应用提供了工程参考。

**关键词:** 井下机器人; 废弃矿井; 水文地质勘察; 水下探测; 河豚IV-A

## Application of Downhole Robot Detection Technology in Hydrogeological Survey of Abandoned Mines

Bo Zhang<sup>1,\*</sup>, Chengcai Jin<sup>1</sup>, Mingwei Hong<sup>1</sup>

1. Liaoning Nonferrous Geological Exploration and Research Institute Co, Shenyang, 110013, China

**Abstract:** Aiming at the problems of complex underwater survey environment, high safety risks of traditional technologies and insufficient detection accuracy in abandoned mines, taking the comprehensive treatment project of Jinjia Sulfide Iron Mine in Xiamatang Town, Nanfen District, Benxi City as an engineering example, the detection technology of the Hetun IV-A small remotely operated underwater vehicle (ROV) is applied to the hydrogeological survey of abandoned mines. This paper expounds the basis for robot equipment selection and its core technical parameters, systematically sorts out the whole process of pre-detection preparation, field operation and data processing, analyzes the survey achievements of robot detection in aspects such as roadway water gushing characteristics and pollution source tracing, and compares the application differences between this technology and traditional survey methods. The results show that the Hetun IV-A underwater robot can complete full-coverage detection of 2333 m underground roadways in abandoned mines, accurately identify the three-dimensional spatial structure of roadways and the law of mine water gushing, and realize fixed-point water and soil sampling at key underwater positions, providing high-precision hydrogeological data for comprehensive mine treatment. Downhole robot detection technology realizes unmanned operation in abandoned mine survey, makes up for the deficiencies

of traditional technologies in hidden area detection and underwater sampling, and improves the safety, accuracy and efficiency of survey work. This paper analyzes the existing problems in the technical application and puts forward optimization countermeasures, providing an engineering reference for the popularization and application of this technology in hydrogeological surveys of similar abandoned mines.

**Keywords:** Downhole robot; Abandoned mine; Hydrogeological survey; Underwater detection; Hetun IV-A

矿产资源开采后遗留的大量废弃矿井, 成为区域生态环境与地质安全的重要隐患<sup>[1]</sup>, 此类矿井普遍存在巷道坍塌、采空区失稳、矿井涌水及重金属污染等问题, 严重威胁周边水土环境安全和居民生产生活<sup>[2]</sup>。水文地质勘察作为废弃矿井综合治理的核心前置工作, 需精准查明矿井巷道分布、涌水来源与通道、水土污染特征等关键信息, 为注浆封堵、涌水处理、矿渣治理等工程设计提供科学依据。传统废弃矿井勘察主要依赖人工勘察、工程物探和钻探技术, 在水下勘察场景中存在显著局限性。随着机器人技术的发展, 水下机器人探测技术凭借无人化作业、环境适应性强、探测手段多元等优势, 成为解决废弃矿井水下勘察难题的有效途径。

目前, 井下机器人技术已在水利工程、海洋探测等领域得到成熟应用<sup>[3]</sup>, 但在废弃矿井水文地质勘察中的应用仍处于探索阶段, 针对老旧硫化铁矿复杂水下环境的工程案例较少, 尚未形成标准化的作业流程。本文以辽宁省本溪市金家硫化铁矿废弃矿井勘察为实例, 系统研究河豚 IV-A 小型缆控水下机器人的应用流程与勘察效果, 分析技术应用中的问题并提出优化对策, 旨在推动井下机器人探测技术在废弃矿山水文地质勘察领域的规范化应用, 为同类工程提供参考。

## 1 废弃矿井水文地质勘察难点与井下机器人技术优势

### 1.1 废弃矿井水文地质勘察核心难点

废弃矿井因长期停采、自然风化及人为破坏, 水文地质条件复杂, 水下勘察面临多重难点, 主要体现在三个方面: 一是作业安全风险高, 矿井巷道涌水淹没、井口坍塌、裂隙发育, 且可能积聚硫化氢等有毒有害气体<sup>[4]</sup>, 人工下井勘察易引发坍塌、中毒、溺水等事故; 二是探测精度要求高, 综合治理工程需精准掌握巷道空间尺寸及形态、涌水点位置等精细化信息, 传统物探技术数据解译精度难以满足要求; 三是水下取样难度大, 废弃矿井涌水携带重金属且酸性较强<sup>[5]</sup>, 需定点采集水土样本进行污染溯源, 传统取样手段无法在水下复杂环境中实现精准取样。

### 1.2 井下机器人探测技术的核心优势

相较于传统勘察技术, 井下机器人探测技术针对废弃矿井水下勘察的难点, 展现出显著的技术优势: 一是无人化作业, 安全性高, 无需人员下井, 通过缆控实现远程操作, 从根本上规避人工勘察的安全风险, 可在高危环境中持续作业; 二是环境适应性强, 覆盖范围广, 专用矿井水下机器人可在无网络、低能见度、强腐蚀的水下环境中作业, 机身小巧、机动性强, 可进入狭窄巷道和隐蔽区域, 有效消除勘察盲区; 三是探测与取样一体化, 数据维度全, 搭载高清摄像头等传感器和前端机械臂, 可同步完成巷道结构探测、水文参数监测和水下水土定点取样, 一次作业获取多维度勘察数据。

## 2 井下机器人探测系统选型与技术参数

### 2.1 设备选型依据

本次勘察以金家硫化铁矿废弃矿井的水文地质勘察需求为导向,结合矿井水下无网络、低能见度、巷道狭窄、水质强腐蚀的作业环境特征,制定设备选型原则:①机身轻量化、模块化,机动性强,适应狭窄巷道和复杂拐角;②具备强推力、高负载特性,可在水流环境中保持稳定作业姿态;③搭载多类型传感器和作业工具,满足结构探测、参数监测、定点取样多重需求;④设备耐腐蚀性强,可适应含重金属涌水的腐蚀环境。

基于上述原则,综合对比国内主流水下机器人产品,选取河豚 IV-A 小型缆控水下机器人作为本次勘察的核心设备。该机器人专为复杂水下环境设计,兼具机动性、稳定性和多功能性,已在救助打捞、桥梁大坝检测等领域得到成熟应用,其技术特征与本次废弃矿井水下勘察需求高度匹配,可实现老旧矿井深部水下环境的精准探测。

## 2.2 河豚 IV-A 水下机器人核心技术参数

河豚 IV-A 小型缆控水下机器人(图 1 所示)采用框架式结构设计,整体性能优异,搭载多种高精度传感器和作业工具,可全方位满足废弃矿井下水文地质勘察技术要求,核心技术参数如下:机身采用轻量化模块化设计,便于现场搬运、布放与回收;配备 3 个水平 TG166 推进器(前后推进器推力 36kg、侧向推进器推力 18kg)和 1 个垂直推进器,静水航行速度 3.5 节,负载能力 5.5kg,可在矿井水流环境中保持稳定作业,轻松应对狭窄巷道、拐角等复杂地形。配备前端机械臂,可实现水下水土样品的定点采集和密封,为矿井污染源分析提供实物样本;机械臂操作灵活,可在狭窄空间内完成取样作业,样本代表性和准确性高。可在矿井环境中实现稳定的远程操控;机身采用耐腐蚀材料,可适应含重金属涌水的强腐蚀环境,保障设备长时间稳定作业。



图 1 河豚 IV-A 水下机器人

Fig. 1 Hetun IV-A underwater robot

## 3 井下机器人探测技术在金家硫化铁矿的工程应用

### 3.1 项目概况

本溪市南芬区下马塘镇金家硫化铁矿为历史废弃矿山,开采矿种为黄铁矿,1993 年停采后遗留大量地质与生态环境问题。该矿山纳入国家“十四五”土壤、地下水和农村生态环境保护规划重点治理项目,获得 2024 年中央土壤污染防治资金支持,治理核心目标为解决矿渣重金属污染和矿井涌水问题,改善区域水土环境质量。

本次水文地质勘察为该矿山综合治理的核心前置工作,勘察任务包括:查明矿井巷道的空间分布与特征;查明矿井涌水来源、通道、涌水量及主副井连通关系;查明矿井水土污染点位及污染程度,为污染源提供依据。该矿山主井、副井及各采矿中段均被涌水淹没,副井井口坍塌,人工勘察无法开展,常规物探和钻探技术难以满足精细化勘察需求,因此引入河豚 IV-A 水下机器人开展水下全域探测。

### 3.2 现场探测作业流程

本次井下机器人水下探测采用“定点布放、全程缆控、分段探测、实时记录”的作业模式，现场作业流程清晰，可分为六个核心步骤，具体如下：

(1) 设备布放：将调试好的机器人从井口平稳投放至水下，通过通讯缆连接控制台，实时监控下井姿态。

(2) 巷道结构探测：采用手动操控模式，沿预设探测路线缓慢推进机器人，通过高清摄像头实时采集巷道视频影像，对巷道断面进行连续扫描，实时测量巷道宽度、高度等空间参数。

(3) 涌水与污染点位识别：通过实时影像，识别涌水点、裂隙及疑似污染区域，记录坐标与深度等信息，为取样定位。

(4) 水下定点取样：针对标记的污染点位、涌水点和典型地质点位，操作人员远程操控机器人前端机械臂，完成水样本和土样本的定点采集与密封。

(5) 数据实时记录与存储：探测过程中，数据采集系统实现视频影像、扫描数据、空间参数、作业轨迹等所有勘察数据的全程同步存储，保障勘察数据的完整性、可追溯性，便于后续数据处理与分析。

(6) 设备回收与现场整理：任务完成后沿原轨迹回收设备，进行清洁与检测；及时转移样本至低温装置，整理数据并做好记录。

本次勘察通过上述流程，利用河豚 IV-A 水下机器人完成了金家硫化铁矿主井、副井及各采矿中段的全覆盖水下探测（图 2 所示），累计完成井巷探测长度 2333m，同时在典型点位完成了水土样本采集，圆满完成勘察任务。

## 4 探测数据处理与水文地质勘察成果分析

### 4.1 水文地质勘察成果

为充分挖掘井下机器人探测数据的价值，采用“分层处理、多源融合、综合分析”的方法，对勘察数据进行系统处理，通过井下机器人探测数据处理与多源数据融合分析，精准查明了金家硫化铁矿废弃矿井的水文地质条件，取得了一系列核心勘察成果。

①巷道及采空区分布特征精准查明：明确了矿山主井、副井及 3 个通风井的空间分布及连通关系，主井由大斜井、平巷、小斜井组成，下设 310、340、370 三个采矿中段；副井由平巷、老斜井、新斜井组成，下设 405、430、472 三个采矿中段，平巷底部淤积褐红色底泥，厚度 50~100cm。

②矿井涌水特征全面掌握：确定矿井涌水主要来源于构造裂隙水和裂隙岩溶水，涌水通道为巷道裂隙及断层带；主副井水体连通性良好，涌水点主要分布在副井平巷 27.5~78.0m 段和主井 340 中段巷道裂隙处，这些区域洞顶滴水、渗水现象显著。

③矿井污染特征精准识别：通过水下定点取样检测，查明矿井涌水携带砷、镉、铅、铜等重金属，污染点位主要分布在副井平巷黄铁矿体段及渣堆下游沉淀池区域，明确矿井重金属污染主要来源于黄铁矿体风化溶滤和历史遗留矿渣淋溶，为污染溯源和治理提供了精准依据。

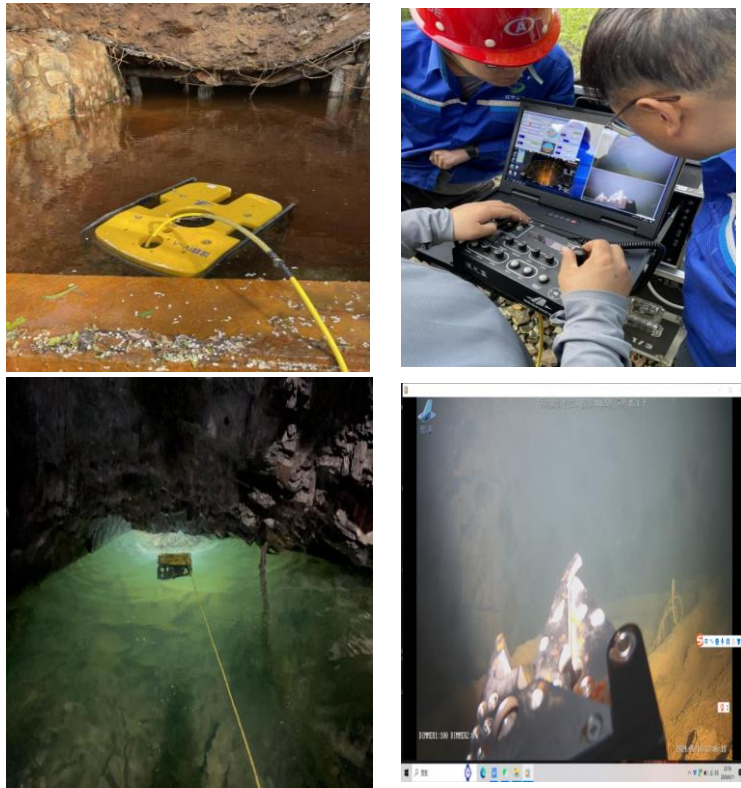


图 2 井下机器人探测照片

Fig. 2 Downhole robot detection photo

#### 4.2 与传统勘察技术的成果对比

本次勘察同时采用了井下机器人探测、工程物探、钻探等多种勘察技术，通过成果对比发现，井下机器人探测技术在废弃矿井水下勘察中具有显著优势，主要体现在：①在巷道结构探测方面，机器人可实现精细化的空间参数测量和可视化影像采集，精准识别巷道微小构造，而物探技术仅能反映宏观地质特征，数据解译多解性强；②机器人可实现采空区全域三维形态探测，而钻探技术仅能获取钻孔周边的点式数据，无法反映巷道整体特征；③在污染溯源方面，机器人可实现水下定点取样，样本代表性强，而传统技术无法完成水下精准取样；④在勘察范围方面，机器人可进入深部狭窄巷道和隐蔽区域，消除勘察盲区，而传统设备受条件限制，勘察范围有限。

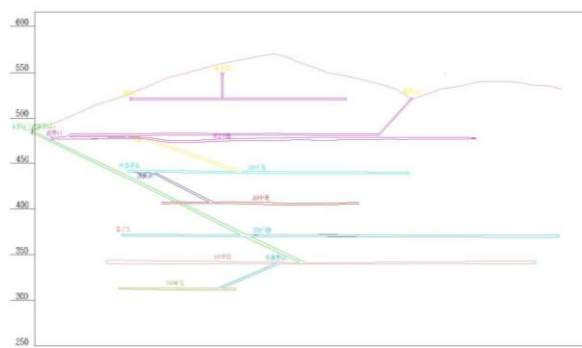


图 3 矿山井巷结构剖面图

Fig. 3 Profile of mine roadway structure

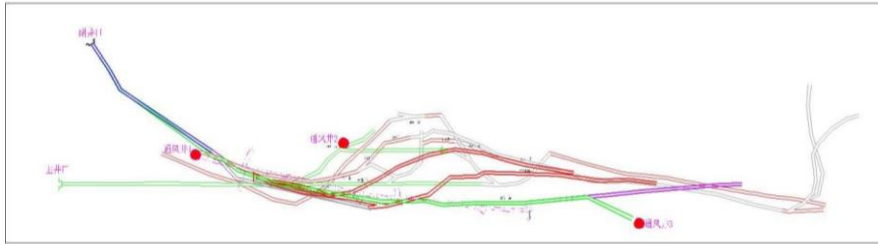


图4 矿山井巷结构平面图

Fig. 4 Plan of mine roadway structure

## 5 结论与展望

### 5.1 研究结论

本文以本溪市南芬区下马塘镇金家硫化铁矿废弃矿井水文地质勘察项目为工程实例，系统研究了井下机器人探测技术的应用流程、数据处理方法和勘察效果，得出以下核心结论：

井下机器人探测技术是解决废弃矿井水下勘察难题的有效手段，可实现无人化、高精度、全覆盖的水下探测，从根本上规避人工勘察的安全风险，弥补传统物探、钻探技术在探测精度、勘察范围、水下取样等方面的不足，大幅提升废弃矿井水文地质勘察的安全性、精准性和效率。

河豚 IV-A 小型缆控水下机器人凭借无网络环境作业、强推力、高负载、探测与取样一体化的技术优势，可完成废弃矿井水下深部巷道的全覆盖探测，精准获取巷道视频影像、空间参数及水土样本，本次勘察累计完成 2333m 井巷探测和典型点位取样，勘察成果精准全面。

通过机器人探测数据与传统勘察数据的融合分析，可精准查明废弃矿井巷道分布、涌水特征、污染点位及采空区稳定性等核心水文地质信息，能够明确重金属污染点位和来源，为矿山综合治理提供了高精度数据支撑。

### 5.2 未来展望

井下机器人探测技术的创新应用，推动了废弃矿井水文地质勘察技术的发展，随着设备智能化和数据融合技术的不断进步，该技术将成为废弃矿山综合治理领域的核心勘察手段，为区域生态环境修复和地质安全保障提供更有力的技术支撑。

## 参考文献

- [1] 林力伟. 废弃矿山生态环境恢复治理责任法律问题研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021: 6-7.
- [2] 双生晴, 刘建平, 刘玉峰, 等. 典型有色金属矿山及渣场环境治理技术综述[J]. 南方金属, 2025, (06): 69-72+77.
- [3] 黄泽光. 水下机器人技术在水利工程检测中的应用[J]. 水上安全, 2023, (07): 13-15.
- [4] 徐耀, 吕璞, 廖庆, 等. 黄铁矿氧化方式的研究进展[J]. 广东化工, 2025, 52(24): 89-91.
- [5] 黄琬云, 李晓. 废弃矿井酸性水成因分析及回填治理研究[J]. 地下水, 2024, 46 (06): 29-30+59.

<sup>1,\*</sup> 作者简介: 张博(1990-), 男, 硕士, 辽宁有色勘察研究院有限责任公司, 研究方向: 水文地质、工程地质及环境地质。 E-mail: 15734035886@163.com。