

钻探救援与其他救援技术协同作业机制创新研究

赵后明 陈鹏

山东省煤田地质局第二勘探队(山东省应急管理厅矿山钻探救援重点实验室), 山东省济宁市, 272100;

摘要: 在矿山坍塌、隧道垮塌等复杂灾害场景中, 单一救援技术往往难以突破极端环境制约, 钻探救援作为构建地下生命通道的核心技术手段, 与生命探测、智能装备、应急通信等技术的协同作业体系, 已成为提升救援效率与成功率的关键支撑。本文结合多起典型复杂灾害事故救援实践, 系统剖析当前钻探救援与多类辅助技术协同作业的发展现状及核心痛点, 从指挥体系、技术融合、资源保障三大维度提出协同机制创新路径, 为构建高效、精准、安全的现代化应急救援体系提供理论支撑与实践参考。

关键词: 钻探救援; 应急协同; 机制创新; 生命通道

DOI: 10.64216/3080-1486.26.02.010

引言

近年来, 我国矿山开采、隧道工程等领域的灾害事故时有发生, 某金矿爆炸事故造成多名人员被困井下, 某铁路隧道坍塌事故导致作业人员失联, 此类事故充分凸显了复杂地质与工程环境下救援工作的极端复杂性与高风险性。钻探救援凭借其地面直达地下的独特技术优势, 成为构建被困区域生命通道的核心手段, 但实践经验表明, 仅依赖钻探技术单一维度发力, 难以实现精准定位、快速响应、安全施救的立体化救援目标。

钻探救援与生命探测、智能机器人、应急通信等技术的协同应用, 能够构建探测—定位—通道—施救的完整救援闭环, 有效弥补单一技术的功能局限。然而, 当前协同作业体系中普遍存在指挥体系分散、技术融合壁垒、资源配置失衡等突出问题, 严重制约了救援效能的最大化发挥。因此, 系统研究钻探救援与辅助技术协同作业的创新机制, 对于提升我国复杂灾害应急救援能力、降低人员伤亡损失, 具有重要的理论价值与现实指导意义。本文结合典型事故救援案例, 深入剖析协同作业的核心矛盾, 探索科学可行的机制创新路径。

1 钻探救援与协同技术体系的核心内涵

1.1 钻探救援技术的核心价值

钻探救援技术通过地面钻孔构建地下连通通道, 根据功能定位可分为小直径生命保障孔与大直径救援通道孔两类核心形式。其中, 小直径孔(直径 50-150mm)主要承担生命探测、给养输送与通信联络功能, 如某金矿事故中关键生命保障孔贯通后, 救援团队通过该通道精准投放营养液、急救药品及通信终端, 为被困人员提供基础生存保障; 大直径孔(直径 600mm 以上)则作

为被困人员升井的核心通道, 是实现最终脱困目标的关键载体。钻探救援的核心价值在于突破坍塌物物理阻隔, 建立地面与地下被困区域的生命连接纽带, 为各类辅助救援技术的深度应用创造基础条件。

1.2 协同救援技术体系的构成

协同技术体系以钻探救援的精准定位、高效施工、安全可控目标为核心导向, 主要涵盖三类功能技术: 一是生命探测技术, 包括超宽带雷达探测、音视频生命探测系统等, 核心作用是精准锁定被困人员位置与生存状态, 为钻探靶点选址提供科学数据支撑, 相关科研团队研发的高精度雷达探测系统, 曾在某石膏矿坍塌事故中成功定位深埋被困人员; 二是智能装备技术, 如无人机现场勘察、防爆救援机器人清障等, 用于快速完成灾害现场环境评估与初期风险处置, 某铁路坍塌事故中, 无人机航拍测绘系统在 1 小时内完成坍塌区域三维建模, 为钻探点位优化提供精准地理数据; 三是应急通信技术, 包括应急卫星通信、钻孔专用通信终端等, 重点解决灾害现场通信中断难题, 保障指挥指令与探测数据的实时双向传输。

1.3 协同作业的内在逻辑

协同作业体系以钻探通道为核心枢纽, 形成探测引导—通道构建—多维施救的逻辑闭环。其内在运行机制表现为: 生命探测技术首先完成被困区域精准定位, 为钻探施工提供精确靶点坐标; 钻探技术构建物理通道后, 通信设备通过该通道建立地面与地下双向联络, 智能救援装备依托通道实施精细化作业; 同时, 水文地质观测、有毒有害气体监测等技术通过钻探孔获取井下环境参数, 为救援方案动态调整提供数据支撑。这种多技术互

补的逻辑关系，有效规避了单一技术在复杂环境下的应用局限，实现救援效能的叠加提升。

2 协同作业机制的现状与核心痛点

2.1 实践探索与初步成效

我国在多起重大灾害事故救援中已开展协同作业实践，积累了阶段性经验。某金矿事故救援中，现场指挥部采用井筒清障与钻孔施救并行的双轨方案，钻探技术与生命探测、通风排烟技术形成高效协同，最终成功救出多名被困人员；某铁路坍塌事故中，专业矿山应急救援队伍将钻探技术与注浆加固、水文动态观测技术有机融合，创新应用偏心潜孔锤跟管钻进+裸眼透巷工艺，实现了成孔效率与作业成功率的双重提升。这些实践案例充分验证了协同作业的应用价值，但机制层面仍存在诸多亟待破解的结构性问题。

2.2 协同作业的核心痛点

指挥协调机制紊乱。灾害现场常出现多头指挥、权责交叉现象，如某金矿事故初期，企业自救力量与政府应急救援队伍衔接脱节，信息上报延迟问题直接造成救援黄金时机的延误；各技术队伍分属不同主管部门，钻探队伍归地质矿产部门管理，消防救援力量由应急管理部门调度，指挥体系的分散化直接导致资源调配效率低下，形成各自为战的局面。

技术融合存在壁垒。一方面数据标准缺乏统一性，生命探测设备输出的坐标信息与钻探设备所需的地质参数体系不兼容，难以实现数据直接对接，易导致钻探靶点偏移，某金矿事故中关键生命保障孔初期偏移量超出安全范围；另一方面工艺衔接缺乏协同设计，钻探作业产生的振动干扰易影响生命探测设备的稳定性，某铁路坍塌事故中曾出现钻探施工导致雷达探测信号失真的技术冲突问题。

资源保障体系滞后。跨区域装备调配效率偏低，某铁路坍塌事故中核心钻探设备从异地调运至事故现场的响应时间过长，错失最佳救援窗口期；装备兼容性不足，不同生产厂家的钻探设备与通信器材接口规格不统一，无法实现快速集成应用，增加了现场调试难度。

应急响应流程固化。现有救援流程多基于单一技术维度制定，缺乏系统性协同预案，如钻探作业前未预留生命探测设备的布设与校准时间，导致技术衔接出现空窗期，客观上延长了整体救援周期。

3 协同作业机制的创新路径

3.1 构建扁平化联合指挥体系

构建现场总指挥部—技术协同专家组—专业执行分队三级扁平化指挥架构。现场总指挥部由应急管理部门牵头组建，统筹整合地质勘察、消防救援、矿山安全等多领域力量，统一制定救援方案与资源调度策略；技术协同专家组由各领域资深专家组成，负责评估技术可行性、优化工艺衔接节点，如某金矿事故中专家组论证确定的3+1多钻孔协同方案，有效提升了决策的科学性与精准度；专业执行分队按技术功能类型实现专业化编组，如钻探作业分队、生命探测分队等，实行队长负责制，确保指挥指令高效传递至作业终端。

同步建立事前备案一事中联动一事后评估的全流程协同机制：事前将各专业技术队伍信息、装备参数录入全国应急资源数据库，明确协同职责清单；事中通过应急指挥平台实现资源动态调度与数据实时共享；事后开展协同效能评估，形成预案优化迭代闭环。

3.2 打造技术融合创新机制

构建多源数据融合中台。依托工业互联网平台技术，搭建应急救援数据共享系统，统一生命探测、地质勘察、钻探施工的数据标准与接口规范，实现探测数据—钻探参数—环境监测数据的实时融合与同步更新。例如将超宽带雷达探测的被困人员坐标信息，通过算法自动转化为钻探设备的精准靶点参数，显著提升钻孔中靶率，相关技术实践数据已证明，该技术融合思路可将钻孔中靶率提升30%以上。

研发场景化协同作业工艺。针对不同地质条件设计差异化融合工艺方案，如复杂破碎地层采用生命探测先行—注浆加固稳层一定向钻探成孔的标准化作业流程，某铁路坍塌事故中应用的偏心潜孔锤跟管钻进+裸眼透巷工艺，便是通过工艺协同有效解决了红泥层缩径、砂层坍塌等技术难题；加快研发多功能一体化协同装备，如集成环境探测、实时通信功能的复合型钻探钻头，实现钻孔施工与井下环境监测同步开展。

建立技术干扰防控体系。通过数值模拟计算钻探施工振动频率与传播路径，优化生命探测设备工作参数以提升抗干扰能力；科学划定各技术作业区域安全距离，设置电磁屏蔽隔离带，有效规避设备间电磁干扰问题。

3.3 完善资源保障协同机制

搭建全国性跨区域资源共享平台。整合全国范围内钻探设备、探测仪器等应急救援资源，建立一物一码数字化管理系统，详细标注装备型号、性能参数、兼容接口、存放位置等关键信息，实现资源精准定位与快速调配。参考某铁路坍塌事故跨区域调运经验，通过平台提

前与设备属地管理单位建立联动机制，大幅缩短装备调配响应时间。

推进协同装备标准化建设。制定应急救援装备协同接口国家标准，明确要求钻探设备预留通信、探测设备通用接口，实现不同装备即插即用；建立装备定期维护、校准与性能检测机制，确保应急状态下装备性能稳定可靠。

构建复合型人才培养体系。开展钻探技术+探测技术+应急通信跨领域复合型人才培训，通过模拟真实灾害场景开展协同作业演练，提升操作人员的技术协同应用能力；建立全国应急救援专业人才储备库，确保灾害发生时可快速集结专业化队伍。

3.4 优化应急响应流程机制

优化形成四阶段标准化协同响应流程：第一阶段（接警后 1 小时内），无人机航拍测绘与生命探测设备同步进场，完成现场初步勘察与被困区域大致定位，同步启动钻探队伍集结指令；第二阶段（接警后 1-3 小时），技术专家组结合探测数据完成钻探点位优化与工艺方案确定，钻探设备进场完成组装调试；第三阶段（接警后 3-12 小时），钻探作业与井下环境动态监测同步进行，通信设备通过先导孔建立地面与地下双向联络；第四阶段（接警 12 小时后），根据井下反馈信息动态调整救援方案，通过大直径救援通道实施被困人员脱困作业。

建立流程动态调整机制，通过实时数据反馈优化各环节时间节点，如探测到井下出现涌水、有毒气体超标等风险时，优先开展排水孔、通风孔施工，待环境风险可控后再进行生命通道构建，确保救援作业安全有序。

4 协同机制创新的实践验证

某金矿重大坍塌事故救援初期，因协同机制缺失导致救援工作陷入被动，后期通过重构协同体系实现救援突破。应用本文提出的创新机制对该案例进行复盘分析，可为同类复杂灾害救援提供实践参考。

指挥层面，紧急成立省、市、县三级一体化指挥部，整合千余名救援人员与多支专业技术队伍，明确各作业组职责边界与协同流程，有效解决了多头指挥问题；技术层面，通过专家组论证将生命探测数据与地质勘察资料深度融合，精准调整关键钻孔靶点参数，由专业钻探特勘队伍采用定向钻进技术实施接力施工，最终实现生命保障孔精准贯通；资源层面，启动国家级跨区域应急资源调配机制，快速调运大孔径钻机与专业作业团队，

为钻孔施工提供坚实保障。

复盘结果表明，若事故初期即应用完善的协同机制，可有效避免信息上报延迟问题，通过数据融合技术减少钻孔偏移误差，预计可将整体救援周期缩短 3-5 天。这一案例充分验证了创新协同机制在提升复杂灾害救援效能方面的核心价值。

5 结论与展望

钻探救援与多类辅助技术的协同作业，是复杂灾害救援领域的必然发展方向。当前协同机制存在的指挥体系混乱、技术融合壁垒、资源保障滞后等问题，严重制约了救援整体效能的充分发挥。通过构建扁平化联合指挥体系、打造技术融合创新机制、完善资源保障协同机制、优化应急响应流程，能够有效破解上述难题，形成指挥统一、技术融合、资源高效、响应快速的现代化协同作业模式。

未来，随着人工智能、大数据、数字孪生等技术的深度渗透，协同机制将向智能协同方向加速升级：通过人工智能算法实现救援场景与技术组合的自动匹配，达成救援方案智能生成与动态优化；利用数字孪生技术构建灾害现场虚拟仿真模型，精准模拟协同作业效果并提前预判风险；研发无人钻探与自主探测机器人系统，最大限度降低救援人员安全风险。这些创新方向将进一步提升协同作业的智能化、精准化水平，为应急救援工作提供更坚实的技术支撑。

应急救援的核心要义是生命至上，协同作业机制的创新不仅是技术层面的突破，更是救援理念的系统性升级。通过持续完善协同机制，整合各方优势力量，构建全域覆盖、高效协同的系统化救援体系，才能在灾害来临时实现快速响应、科学施救，最大限度保障人民群众的生命财产安全。

参考文献

- [1] 武程亮, 滕子军, 赵后明, 等. 矿山钻探应急救援中生命通道的钻井技术——以山东栖霞笏山金矿事故救援 1 号孔为例 [C] // 第二十一届全国探矿工程 (岩土钻掘工程) 学术交流年会论文集. 2021.
- [2] 张双伟, 焦叶红, 曹理利, 等. 一种应急救援钻探设备运行状态监控系统: CN202410828398.1 [P]. CN118855442B [2025-12-02].
- [3] 曹晟, 宋朝辉, 李振川, 等. 基于 Drillbench 的救援井压井模拟技术研究 [J]. 石化技术, 2025, 32(5): 273-275.