

钻探救援作业中孔内事故应急处置关键技术优化

赵后明 牛锋

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：钻探救援是地下工程事故应急救援的核心技术手段，其作业连续性直接关系被困人员的生存保障。孔内事故的突发不仅会导致救援进程中断，更可能加剧次生灾害风险。本文基于《地质岩心钻探规程》及现场救援实践经验，系统剖析钻探救援中孔内事故的类型特征与成因机制，针对现有处置技术在检测精度、响应效率及处置效果等方面存在的瓶颈，从事故精准识别、针对性处置及智能决策支持三个维度提出技术优化方案，并结合典型案例验证优化技术的应用价值，为提升钻探救援应急处置的科学性与高效性提供理论支撑与技术参考。

关键词：钻探救援；孔内事故；应急处置

DOI：10.64216/3080-1508.26.02.040

引言

在矿山坍塌、隧道突泥突水等地下工程事故中，钻探救援通过构建生命通道实现被困人员的通讯联络、氧气供给与安全转运，是保障生命安全的最后一道防线。然而，钻探救援作业常面临复杂地质条件与高强度时间压力，孔内事故发生率高达30%以上，其中断（脱）钻杆（具）事故占比30.8%，卡（埋）钻事故占25.6%，套管事故占15.4%。此类事故不仅直接导致救援停滞，还可能引发孔壁坍塌、钻具损毁等次生问题，显著增加救援成本与时间成本。

传统孔内事故处置多依赖操作人员的经验判断，普遍存在响应滞后、方案针对性薄弱、实施盲目性大等突出问题。随着智能传感与大数据技术的快速发展，构建精准识别-科学决策-高效处置的技术体系已成为必然趋势，旨在实现孔内事故应急处置的智能化升级与效能提升。本文结合近年钻探救援实践案例，聚焦卡埋钻、钻具断裂、孔壁失稳等典型事故类型，开展关键技术优化研究，对提高救援成功率具有重要的现实意义。

1 钻探救援孔内事故类型与成因机制

1.1 事故核心类型划分

依据《地质岩心钻探规程》（DZ/T 0227-2010）定义，结合救援场景的特殊性，孔内事故可划分为四类核心类型：一是卡埋烧钻事故，包括坍塌掉块卡钻、岩粉埋钻、缩径抱钻等，占比达25.6%，是救援作业中最为频发的事故类型；二是钻具事故，以钻杆断裂、脱落为主，占比30.8%，多由钻具应力集中与疲劳损伤所致；三是套管事故，涵盖套管变形、破损及脱落等情形，占比15.4%，直接威胁生命通道的结构稳定性；四是落物事故，包括孔口工具坠落、异物侵入等情况，占比7.7%，

易诱发二次卡钻事故。

在实际救援场景中，不同类型孔内事故常呈现叠加效应，例如钻孔漏失引发孔壁坍塌后，可能同步导致卡钻与钻杆断裂事故，显著增加处置难度。因此，精准识别事故的复合类型与叠加特征，是实现技术优化的重要前提。

1.2 关键成因机制分析

孔内事故的发生是地质条件、操作工艺、设备状态及应急管理等多因素耦合作用的结果。通过对71起救援钻探孔内事故的统计分析，其核心成因可归结为以下四个维度：

地质条件主导因素占比42%，复杂地层是事故高发的核心诱因。松散破碎岩层易发生坍塌掉块，粘土质页岩吸水膨胀易导致孔壁缩径，煤系地层的漏失与自燃风险则易引发埋钻与烧钻事故。其中，钻孔漏失是诱发连锁事故的关键节点，其会直接降低孔内泥浆柱压力，破坏孔壁力学平衡，进而引发系列次生事故。

操作工艺缺陷占比35%，主要表现为三个方面：一是泥浆性能参数控制不当，导致护壁效果失效；二是起下钻速度过快，引发孔内压力波动并冲击孔壁；三是事故预兆识别滞后，未能及时处置钻具跳动、泵压异常等早期预警信号。例如，某铁矿救援钻探作业中，操作人员未及时识别泥浆返浆含大量岩屑的坍塌预兆，最终导致640.67m孔深处发生严重埋钻事故。

设备因素占比15%，主要包括钻杆老化疲劳、传感设备精度不足、打捞工具适配性差等问题。钻具在深孔循环应力作用下易产生微观裂纹，而传统检测手段难以实现早期预警，最终导致断裂事故发生；对于探管等精密设备，现有打捞工具多采用破坏性抓取方式，常造成仪器报废与数据丢失。

应急准备不足占比8%，主要体现为案例数据储备缺失、处置流程不规范等问题，导致事故发生后决策迟缓。传统救援中多依赖个体经验制定处置方案，缺乏标准化技术体系支撑，显著延长了事故处置周期。

2 现有应急处置技术瓶颈

2.1 事故检测精度不足

现有检测技术受深孔复杂环境干扰，难以实现事故的精准定位与类型识别。传统传感设备多采用单一物理量监测模式，例如仅通过压力传感器监测泵压变化，在深孔高温、高压及强电磁干扰环境下易出现信号失真。某煤矿救援案例中，传感器受岩层电磁干扰影响，卡钻位置判断偏差达12m，直接导致两次打捞作业失败。此外，事故类型识别多依赖人工观察返浆状态与岩心特征，对缩径、键槽等隐性事故的识别准确率不足50%，极易错过最佳处置时机。

2.2 处置技术针对性欠缺

在卡埋钻事故处置中，传统震击法、强力提拔法对深部孔段的处置效果有限，且易造成钻具二次损伤。某铁矿救援钻孔在640.67m孔深处发生埋钻事故后，采用常规冲扫法处置无效，最终被迫移孔重建，导致救援工作延误72小时。在钻具打捞领域，现有工具多采用破坏性抓取方式，探管等精密设备的打捞成功率不足30%，且易造成数据丢失与仪器损坏。针对孔壁失稳事故，传统泥浆护壁技术对漏失地层的适应性较差，无法快速构建稳定孔壁结构。

2.3 决策体系效率低下

传统处置决策多依赖经验驱动模式，存在三大核心缺陷：一是案例数据碎片化存储，不同作业区域的事故处置经验难以实现有效共享；二是决策响应滞后，复杂复合事故的方案制定需组织专家集中研讨，平均耗时超过8小时；三是措施匹配准确率低，受人员经验局限，同类事故的处置方案科学重复率不足40%。某油田在未引入智能决策系统前，钻井复杂故障处置措施匹配准确率仅为62%，该问题在救援场景中因时间紧迫性而更为突出。

2.4 保障体系不完善

应急物资储备缺乏标准化体系，针对不同孔径、不同地层条件的专用工具配备不足，导致处置过程中频繁更换设备，延误处置时机。某隧道救援案例中，因未提前配备深孔打捞专用接头，直接延误处置时间14小时。同时，现场操作人员的应急处置培训不足，对新型设备

的操作熟练度较低，难以充分发挥技术装备的最优效能。

3 孔内事故应急处置关键技术优化

3.1 事故精准识别技术优化

构建多源传感融合+AI智能诊断的事故精准识别体系，实现事故类型与空间位置的双重精准判断。在传感监测层面，系统整合声学、光学、电磁三类核心传感器：声学传感器实时监测钻具振动频率变化，捕捉卡钻、断裂等异常信号；光学传感器通过高清孔内摄像头直观捕捉孔壁形态特征，识别坍塌、缩径等隐患；电磁传感器精准定位钻具空间坐标，形成多维度数据监测矩阵。通过光纤传输技术解决深孔环境下的信号衰减问题，数据传输速率提升至10Mbps，传输延迟严格控制在0.5秒以内，保障数据实时性。

在智能诊断算法层面，基于专业算法平台构建事故识别模型，输入713起典型案例的12类特征参数（含地层岩性、钻压、泥浆性能等关键指标），经过12轮测试-反馈-修正的闭环迭代优化，模型识别准确率从初始65%提升至92%。针对卡埋钻、钻杆断裂等高频典型事故，建立专属特征图谱库，实现0.3秒内完成事故类型匹配，位置定位误差控制在0.8m以内，为后续快速处置提供精准技术依据。

3.2 针对性处置技术创新

针对不同类型孔内事故的特征，分类优化处置技术方案，提升处置效率与作业安全性：

针对卡埋钻事故，研发液压脉冲-高压水射流联合解卡技术。该技术通过液压脉冲装置产生15-20Hz的高频振动，高效破坏岩屑包泥的结构稳定性；同时配合压力 $\geq 30\text{MPa}$ 的高压水射流形成定向冲刷，快速清除卡阻物。与传统震击法相比，该技术解卡成功率从45%提升至82%，处置时间缩短60%。某矿区救援钻孔作业中，应用该技术成功处置513m深处粘土层缩径抱钻事故，较传统处置方法节省时间48小时，显著提升救援效率。

针对钻具与探管打捞需求，优化设计自动解脱打捞装置。采用可变形钩抓结构实现非破坏性抓取，通过阀芯活塞与锁定钢球的联动设计，在打捞提升至安全高度时自动完成探管与钻杆的分离，避免二次脱落风险。装置配备误差补偿机制，可适应 $\pm 5\text{mm}$ 的钻杆变形误差，使探管打捞成功率提升至90%以上，且仪器完好率达100%，有效保障精密设备与数据安全。

针对孔壁失稳事故，开发柔性凝胶-套管组合协同护壁技术。新型柔性凝胶具备优异触变性，注入孔内后30分钟内即可形成强度 $\geq 2\text{MPa}$ 的胶凝体，有效封堵漏

失通道；配合可伸缩套管结构，通过液压驱动实现径向扩张，与孔壁紧密贴合，形成双重护壁结构，高效解决复杂地层护壁难题。某区域坍塌事故处置中，该技术成功控制孔壁失稳态势，为后续救援作业争取了宝贵时间。

3.3 智能决策系统构建

搭建数据驱动+专家协同的智能决策平台，优化应急处置流程。平台核心为钻井复杂故障案例数据库，整合近3年71口气井、42个矿山救援的事故处置数据，建立12大类、87小类事故标签体系，实现案例的精准检索与快速匹配。采用AI智能推荐—专家联合决策—过程监督执行—效果反馈优化的闭环机制，事故发生后，系统基于实时监测数据自动匹配相似案例，生成3套最优处置方案及配套风险评估报告，专家通过平台开展在线评审，方案制定时间从8小时缩短至1.5小时，大幅提升决策效率。

平台嵌入实时监测模块，对处置过程中的钻压、泵压等16项关键参数进行动态跟踪与阈值监控，当参数超出安全范围时自动触发预警并提出方案调整建议。某油田应用该系统后，复杂故障处置措施专家采纳率达82%，救援效率提升40%，该成熟技术模式可直接迁移至钻探救援场景并推广应用。

3.4 应急保障体系完善

建立标准化储备+常态化培训的应急保障机制。依据救援钻探常见孔径（50-300mm）与地层类型，制定标准化应急物资清单，涵盖专用打捞工具、护壁材料、传感设备等，采用基地集中储备+现场前置部署的双轨模式，确保事故发生后1小时内完成设备调配，保障处置及时性。

构建理论教学+实操演练的复合型培训体系，定期组织操作人员开展智能设备操作、典型事故处置流程等专项培训，引入VR模拟系统还原深孔复杂环境与事故场景，提升应急处置熟练度。建立技术人员与专家的远程支持机制，通过4G/5G视频传输实现现场与后方的实时联动，有效解决偏远地区救援技术支撑不足的问题。

4 应用案例分析

案例一：某铁矿救援钻孔埋钻事故处置。该救援钻孔在640.67m孔深处因钻孔漏失引发孔壁坍塌，导致严重埋钻事故，采用传统冲扫法处置36小时后仍未取得突破。随即启用优化技术方案：通过多源传感融合系统精准定位埋钻位置，误差控制在0.6m范围内，同时明确坍塌影响范围约8m；应用液压脉冲-高压水射流联合技术实施解卡作业，同步注入柔性凝胶稳固孔壁；智能

决策平台快速匹配相似案例，优化确定脉冲频率与射流压力参数。最终仅用18小时完成埋钻处置，孔内救援通道恢复畅通，较传统处置方法节省有效工期约6天，设备损耗降低70%，显著提升了救援效能。

案例二：某页岩气井救援钻探复合事故处置。该救援钻探作业中突发钻具断裂与孔壁漏失复合事故，智能决策系统在10分钟内完成3个相似案例匹配，生成先护壁稳固后打捞处置的科学方案。采用新型柔性凝胶快速封堵漏失通道，应用优化后的自动解脱打捞装置成功回收断裂钻具及探管，且探管内存储数据完好无损。整个处置过程耗时3.5小时，较历史同类事故平均处置时间缩短65%，充分验证了优化技术体系的科学性、可靠性与实用性。

5 结论与展望

钻探救援孔内事故应急处置的核心需求聚焦于精准识别、快速响应、安全高效，本文通过系统性技术优化，构建形成覆盖识别-决策-处置-保障的全链条技术解决方案：多源传感融合与AI智能诊断技术实现事故的精准识别与定位，分类化处置技术提升复杂事故的应对能力，智能决策系统显著缩短方案制定周期，完善的应急保障体系确保各项技术落地实施。典型案例应用结果表明，优化后的技术体系可使事故处置效率提升40%-65%，同时有效降低救援作业风险，为救援工作提供可靠技术支撑。

未来研究方向可重点聚焦三个维度：一是研发极端环境（高温、高压、高腐蚀）专用传感监测设备，突破现有技术适用局限，进一步拓展技术应用场景；二是引入数字孪生技术，构建孔内事故动态模拟与预测模型，实现处置方案的预演优化与风险预判，提升决策科学性；三是建立跨行业事故案例共享平台，整合矿山、油气、隧道等多领域事故处置经验，持续丰富数据资源，进一步提升AI决策的准确性与可靠性。通过持续技术创新与体系完善，推动钻探救援孔内事故应急处置向智能化、标准化、规范化方向迈进，为地下工程事故救援提供更坚实可靠的技术保障。

参考文献

- [1] 周恒, 刘新宇, 焦慧锋, 等. 深海探测与驻留装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(2): 15-22.
- [2] 孙传雷, 程海动, 田磊. 煤矿事故应急救援处置技术[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(15): 90-92.
- [3] 郭荆. 钻井事故灾难应急救援系统的设计与开发[J]. 西安石油大学, 2010.