

深部钻探救援孔壁稳定性控制技术及其工程实践

潘卫国 陈青春

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，272100；

摘要：随着深部资源开发与地下工程建设的持续推进，矿山突水、冲击地压等灾害频发，地面钻探救援已成为保障被困人员生命安全的核心技术手段。孔壁稳定性直接决定救援通道的构建效率与施工安全，其失稳问题在深部复杂地质条件下更显突出。本文以岩体力学理论为支撑，系统剖析深部钻探救援孔壁失稳的地质与工程诱因，构建预防-监测-治理一体化控制技术体系，并结合多起典型矿山救援工程实践，验证该技术体系的科学性与实用性。研究成果可为深部应急救援通道的快速、安全构建提供理论支撑与技术参考。

关键词：深部钻探；应急救援；孔壁稳定性

DOI：10.64216/3080-1508.26.03.077

1 引言

1.1 研究背景

我国矿产资源开采已迈入深部时代，矿井平均开采深度达 800 米，部分老旧矿山开采深度更是超过 1500 米。深部地层普遍呈现高应力、高水压、高温度的三高特征，导致冲击地压、煤与瓦斯突出、矿井突水等灾害的发生概率显著攀升。据行业权威统计数据，近年来我国重大矿山灾害中，约 42% 的救援行动需依赖地面钻探构建生命通道。与常规勘探钻探不同，救援钻探具有时间紧迫性强、定位精度要求高、地层扰动敏感性突出的鲜明特点，孔壁坍塌、缩径等失稳问题不仅会严重延误救援时机，更可能诱发二次灾害，加剧事故危害。

某石膏矿坍塌事故中，初期施工的救援孔因破碎地层孔壁失稳多次报废，导致被困人员营救周期大幅延长；某煤矿突水事故救援过程中，救援孔透巷阶段因泥浆涌入被困巷道，被迫暂停施工长达 72 小时。此类案例充分凸显，孔壁稳定性控制已成为制约深部钻探救援成效的核心技术瓶颈。

1.2 研究现状与不足

国内外学者针对钻探孔壁稳定性已开展大量基础性与应用性研究：Hoek 提出的岩体强度准则为深部孔壁稳定性分析提供了核心理论支撑，其 2002 年改进版公式引入地质强度指标（GSI），可精准量化岩体破碎程度对孔壁稳定性的影响规律；国内相关科研机构研发的双钻头扭矩自平衡钻进技术，通过优化钻具力学特性减少对孔壁的扰动，将复杂地层孔壁稳定率提升至 92% 以上。

但现有技术深部救援场景中仍存在明显适配性不足：一是复杂弱面地层的稳定性预测精度偏低，因忽略岩体渗透与传热各向异性，易导致坍塌压力计算误差

超过 30%；二是控制技术针对性不强，缺乏基于具体地质条件的一地一策个性化设计；三是动态调控能力薄弱，难以实时响应深部地层应力的动态变化特征。为此，亟需构建一套适配深部救援场景的孔壁稳定性控制技术体系。

2 深部钻探救援孔壁失稳机理与影响因素

2.1 失稳机理

深部钻探救援孔壁失稳的本质，是钻孔开挖打破岩体原有力学平衡后的宏观力学响应过程，主要表现为两种典型形式：一是剪切破坏，当钻孔开挖引发围岩应力重分布，导致孔壁周围岩体最大主应力超过其抗剪强度时，孔壁会出现剪切裂隙并逐步扩展贯通，最终引发块状或片状坍塌，该形式在高应力硬岩地层中最为常见；二是塑性流变，在软岩或破碎松散地层中，孔壁岩体在持续应力作用下会发生不可恢复的塑性变形，导致孔径缩径，严重时将造成钻具卡埋事故。

基于莫尔-库仑强度准则，孔壁剪切破坏的判据可表示为： $\tau \geq C + \sigma \tan \varphi$ （其中 τ 为孔壁岩体剪切应力， C 为岩体黏聚力， σ 为孔壁岩体正应力， φ 为岩体内摩擦角）。在深部地层中，地应力随埋深呈线性增长趋势（应力计算式为 $\sigma = \gamma H$ ， γ 为岩体容重， H 为地层埋深），当埋深超过 1000 米时，垂直地应力可达 25MPa 以上，显著增加孔壁剪切破坏风险，该判据为孔壁稳定性量化分析提供了核心依据。

2.2 关键影响因素

2.2.1 地质因素

岩体力学参数是决定孔壁稳定性的核心基础，完整坚硬岩体的单轴抗压强度可达 80MPa 以上，而破碎松散岩体单轴抗压强度仅为 5-10MPa，后者孔壁失稳概率约为前者的 6 倍。地质构造直接控制孔壁失稳的范围与

程度,断层破碎带、节理密集带易形成应力集中区,某煤矿救援井施工中钻遇落差5米的断层时,孔壁塑性区范围从正常地层的1.2米扩展至4.5米。地下水是加剧孔壁失稳的关键诱因,其产生的渗透压力可使岩体有效应力降低30%-50%,在砂卵石等松散地层中极易引发管涌型孔壁坍塌。

2.2.2 工程因素

钻进参数直接影响孔壁扰动程度,当钻压超过150kN时,钻具对孔壁产生的径向挤压力可增加20%,易诱发应力型孔壁失稳;冲洗液护壁性能是孔壁稳定的重要保障,黏度低于25s的冲洗液无法有效携带岩屑,易导致岩屑在孔底沉积形成埋钻隐患。孔身结构设计的不合理性,会进一步放大孔壁失稳风险,某金矿初期救援孔因未设置技术套管,在800米深度含水层段发生涌水,导致孔壁坍塌长度达12米,严重影响救援进度。

2.2.3 环境因素

深部地层温度效应显著,地层温度每升高10°C,岩体弹性模量约降低5%-8%,同时会导致冲洗液性能衰减,如常规聚合物冲洗液在120°C以上环境中易发生降解,丧失护壁功能。地应力非均质性是深部孔壁失稳的深层隐患,当水平应力与垂直应力比值超过1.5时,孔壁易出现不对称破坏,形成椭圆形孔径,增加钻具磨损与卡钻风险。

3 深部钻探救援孔壁稳定性控制技术体系

针对深部救援快、准、稳的核心技术需求,本文构建地质预判-主动预防-实时监测-应急治理一体化孔壁稳定性控制技术体系,通过各环节的协同联动,实现对孔壁稳定性的全流程、精细化管控。

3.1 基于地质建模的预判技术

采用先导钻探+综合物探+数值模拟的多源信息融合预判方法:通过先导孔施工获取岩体黏聚力、内摩擦角等核心力学参数,利用超宽带雷达探测孔周30米范围内的隐伏断层、节理等地质构造;基于FLAC3D数值模拟软件建立三维地质力学模型,采用Hoek-Brown强度准则计算不同深度孔段的坍塌压力与稳定安全系数。某煤矿救援项目应用该方法,精准识别出2处隐伏破碎带,通过提前调整钻进参数与护壁方案,有效规避了孔壁失稳风险。

基于数值模拟结果建立孔壁失稳风险分级标准:稳定安全系数 ≥ 1.2 为低风险孔段,采用常规钻进工艺即可满足要求;安全系数0.8-1.2为中风险孔段,需强化冲洗液护壁与钻进参数控制措施;安全系数 ≤ 0.8 为高风险孔段,必须实施预注浆加固等预处理措施。该分级方法

使救援孔施工的风险识别准确率提升至90%以上,为技术方案优化提供了量化依据。

3.2 主动预防控制技术

3.2.1 高性能冲洗液护壁技术

针对不同地层物理力学特性,研发专用冲洗液护壁体系:在破碎硬岩地层,采用膨润土+高分子聚合物+页岩抑制剂复合冲洗液体系,将黏度控制在30-35s,动切力维持在 $\geq 15\text{Pa}$,可在孔壁形成3-5mm厚的致密泥皮,显著降低地下水渗透压力对孔壁的破坏;在软岩及易缩径地层,应用防塌润滑型冲洗液,通过添加2%-3%的石墨粉优化润滑性能,将钻具与孔壁的摩擦系数从0.35降至0.12,有效减少摩擦扰动引发的孔壁变形。某石膏矿救援工程中,该技术使破碎带孔壁稳定时间从4小时延长至72小时,为生命保障孔的连续施工提供了关键支撑。

3.2.2 优化钻进与套管支护技术

采用双钻头扭矩自平衡钻进系统优化钻进工艺,通过内外钻头逆向同步回转设计,使上部钻具仅承受轴向力作用,大幅降低对孔壁的径向扰动,孔壁扰动强度较常规钻进降低60%,同时通过交替给进控制技术可将孔斜精度控制在 $0.5^\circ/100\text{m}$ 以内。优化套管支护方案实现分层护壁:在第四系松散覆盖层采用 $\Phi 1200\text{mm}$ 表层套管封隔;在含水层与破碎带等风险段下入 $\Phi 890\text{mm}$ 技术套管,固井水泥浆抗压强度 $\geq 20\text{MPa}$,确保支护可靠性;在救援孔透巷段采用膨胀套管,膨胀率达15%-20%,实现套管与孔壁的紧密贴合,提升末端支护效果。

3.2.3 智能钻探参数优化技术

构建感知-决策-执行一体化智能钻进参数调控系统:通过近钻头传感单元实时采集孔内压力、温度、钻杆振动频率等关键参数,数据传输速率达100kb/s,确保参数反馈的实时性;基于BP神经网络算法构建参数优化模型,动态匹配钻压(80-120kN)、转速(60-80r/min)、冲洗液排量(50-80m³/h)等核心钻进参数。某煤矿救援实践表明,该系统的应用使钻进效率提升35%,孔壁失稳次数从5次降至1次,显著提升了施工安全性与效率。

3.3 实时监测与应急治理技术

建立多维度、实时化孔壁稳定性监测体系:采用孔内电视成像技术监测孔壁裂隙发育与泥皮完整性,图像分辨率达0.1mm,可精准识别早期失稳迹象;通过分布式光纤传感技术实时监测套管应力变化,将预警阈值设定为材料屈服强度的70%,实现失稳风险的提前预警。当监测数据显示孔壁位移超过5mm/h或应力出现突变时,立即启动应急治理流程,避免风险扩大。

应急治理采用注浆加固+物理支撑协同处置方案,实现不同失稳程度的精准应对:针对孔壁裂隙发育等轻微失稳情况,注入水泥-水玻璃双液浆,将凝结时间精确控制在3-5分钟,实现裂隙的快速封堵;面对孔壁坍塌等严重失稳事故,先下入 $\Phi 146\text{mm}$ 孔壁管实施临时刚性支撑,防止坍塌范围扩大,再采用聚氨酯浆液进行全断面注浆加固,确保浆液扩散半径达到1.5-2.0米,形成稳定的支护结构。某煤矿救援工程中,应用该方案成功治理890米深度的坍塌孔段,仅用12小时便恢复正常施工,为救援行动争取了宝贵时间。

4 工程实践案例

4.1 某煤矿突水事故救援工程

4.1.1 工程概况

该煤矿发生底板突水事故后,32名矿工被困于-890米水平运输巷道,亟需通过构建 $\Phi 580\text{mm}$ 大直径救援井实施生命救援。先导钻探揭示,该区域地层从上至下依次为第四系黏性土(0-50m)、砂卵石层(50-80m)、二叠系砂岩与泥岩互层(80-890m),其中650-680m段为断层破碎带,岩体完整性系数仅0.35,涌水量达 $7\text{m}^3/\text{h}$,孔壁稳定控制难度极大。

4.1.2 控制技术应用

1)地质预判:通过先导孔精准获取各层段岩体力学参数,确定破碎带区域GSI值为35-45,基于Hoek-Brown准则计算得出该段坍塌压力为18-22MPa,明确650-680m段为孔壁失稳高风险区;2)主动预防措施:在0-80m松散地层下入表层套管封隔,破碎带施工中采用黏度32s的聚合物复合冲洗液,搭配双钻头钻进工艺,将钻压严格控制在100kN,减少孔壁扰动;3)监测与应急处置:通过孔内监测系统发现660m处孔壁位移达8mm/h,超出预警阈值,立即启动应急注浆流程,注入聚氨酯浆液 12m^3 ,注浆压力维持在2.5MPa,确保浆液充分填充裂隙。

4.1.3 实施效果

该救援井施工周期为28天,较计划工期缩短12%,孔壁稳定率达96%,透巷精度误差 $\leq 0.3\text{m}$,最终成功将32名被困矿工全部安全救出。与传统施工技术相比,本次施工效率提升40%,护壁材料与固井成本降低25%,达成安全保障与施工效益的双重目标。

4.2 某金矿坍塌事故救援工程

某金矿发生巷道坍塌事故后,11名矿工被困井下作业区域,救援孔需穿越1200米复杂地层,其中800-950m

段为节理密集带,岩体单轴抗压强度仅8MPa,属于典型的低强度易失稳地层,孔壁稳定控制极具挑战。本次救援全面应用本文提出的预判-预防-监测-治理技术体系:1)优化孔身结构设计,设置表层套管+技术套管+生产套管三级支护结构,实现风险分层管控;2)配套使用防塌润滑冲洗液与膨胀套管,强化孔壁支护效果;3)通过多源信息探测系统实现施工全过程实时监测,确保风险早发现、早处置。最终救援孔施工仅耗时35天,孔壁未发生重大失稳事故,成功营救全部被困人员,孔斜精度控制在 $0.4^\circ/100\text{m}$ 以内,达到行业领先水平。

5 结论与展望

5.1 结论

1)深部钻探救援孔壁失稳是地质条件、工程扰动、环境因素多场耦合作用的结果,其中岩体力学参数、地应力分布特征及钻进参数是核心控制因子,基于Hoek-Brown准则的数值模拟方法可实现失稳风险的精准预判,为技术方案制定提供量化支撑;2)本文构建的预判-预防-监测-治理一体化控制技术体系,通过整合高性能冲洗液护壁、智能钻进参数调控、精准注浆加固等关键技术,能够系统性提升孔壁稳定性;3)工程实践验证表明,该技术体系可使复杂地层救援孔壁稳定率 $\geq 95\%$,施工效率提升35%以上,为深部应急救援通道构建提供了可靠的技术保障。

5.2 展望

未来需重点围绕以下三方面开展深化研究:1)研发适配超深部($>1500\text{m}$)高温环境的耐温型冲洗液体系,攻克 150°C 以上高温条件下冲洗液性能衰减的技术难题;2)构建AI驱动的智能调控系统,融合实时监测数据与地质数据库,实现钻进参数的毫秒级响应与自适应优化;3)开发新型轻质高强度套管材料,结合3D打印技术优化套管结构,降低深孔施工难度与装备能耗。同时,应加快构建全国性深部救援地质数据库,推动技术体系的标准化与规范化应用,提升我国深部矿山应急救援的整体技术水平。

参考文献

- [1]李源汇.彬长矿区高家堡矿井大直径排水钻孔施工技术[J].钻探工程,2025,52(4):139-145.
- [2]张晓静.水敏/松散地层钻井液的护壁机理分析与应用研究[D].中国地质大学,2007.
- [3]林俊宇,黄杨,孔卫开,等.西藏纳木错湖泊钻探项目施工概述[J].四川地质学报,2025(z1).