

破碎岩层探矿工程钻进塌孔防治技术

欧阳博

河北省地矿局第七地质大队 (河北省地质矿产勘查开发局雄安地质调查监测中心) 河北 廊坊 065201

摘要: 破碎岩层是探矿工程钻进中最常见且最难处置的复杂地层之一, 孔壁失稳引发的塌孔事故严重影响钻进效率、取心质量和钻孔安全。本文从破碎岩层的工程地质特性出发, 深入剖析了钻进塌孔的力学机理与主要致塌模式, 系统梳理了地质因素、工艺因素和时间因素对孔壁稳定性的耦合影响规律。在此基础上, 构建了涵盖钻前预测评价、冲洗液护壁、工艺参数优化、套管护壁及固结灌浆等多层次技术的综合防治体系, 并提出了基于破碎程度分级的适应性技术组合原则。研究认为, 破碎岩层塌孔防治的核心在于平衡“力学支撑”与“化学稳定”的双重需求, 须将孔壁稳定性视为动态演化的系统问题, 采用预防为主、综合治理的策略。本文旨在为探矿工程中破碎地层钻进的安全高效实施提供系统的技术参考。

关键词: 破碎岩层; 探矿工程; 钻进塌孔; 孔壁稳定; 护壁技术; 冲洗液

引言

探矿工程是获取地下地质信息、评价矿产资源储量的直接手段, 钻探施工的质量与安全直接关系到地质勘查的成效。在我国金属矿产、煤炭及铀矿等资源勘查中, 破碎岩层广泛发育, 包括断层破碎带、层间破碎带、风化破碎带及构造角砾岩带等。这类地层结构松散、胶结性差、裂隙发育, 在钻进过程中孔壁极容易失稳, 引发坍塌、掉块、卡钻乃至埋钻等严重事故。据行业统计, 破碎复杂地层中的钻进事故率较完整地层高出数倍, 其中塌孔事故占比超过四成, 由此造成的工期延误和成本增加成为制约探矿效率的突出瓶颈。针对破碎岩层钻进难题, 国内外学者和工程技术人员开展了大量研究, 在泥浆护壁、套管隔离、水泥固结、空气反循环等方面取得了诸多成果。然而, 由于破碎岩层的非均质性和地质条件的复杂性, 现有防治技术往往呈现“单点突破、系统不足”的特点, 缺乏对不同破碎程度和成因条件下技术适配性的系统性认识。许多现场仍依赖经验性操作, 缺乏科学的预判和动态调整机制。本文旨在从破碎岩层塌孔的力学机制入手, 系统分析影响因素, 构建一套层次清晰、便于现场应用的综合防治技术框架, 为探矿工程破碎地层钻进提供理论指导和实践参考。

1 破碎岩层钻进塌孔的机理与特征

1.1 破碎岩层的工程地质特征

破碎岩层是岩石完整性遭到破坏、连续性受到显著削弱的岩体。从成因角度, 可分为构造破碎带(如断层角砾岩、糜棱岩)、风化破碎层(如强风化花岗岩、破

碎砂岩)和成岩不整合破碎带(如砾岩、粗碎屑岩)。其共同的工程地质特征表现为: 结构面发育, 岩块间以点接触或少量胶结物连接, 内聚力通常低于 0.2 MPa, 内摩擦角多小于 30°; 孔隙率可达 5%~15%, 渗透系数在 10^{-4} ~ 10^{-2} cm/s 量级; 岩体完整性系数 (K_v) 多小于 0.55, 单轴抗压强度普遍低于 30 MPa。这些特征决定了破碎岩层在钻进中孔壁自稳能力严重不足。

1.2 孔壁失稳的力学机制

钻孔形成后, 原岩应力场在孔壁附近发生重新分布, 产生切向应力集中和径向应力卸载。对于完整岩体, 若岩体强度足以抵抗应力集中, 孔壁可维持稳定; 而对于破碎岩体, 其结构面强度远低于岩块强度, 孔壁周边极易沿裂隙面发生剪切滑动或张拉破坏。具体而言, 塌孔过程可分为三个阶段: 初始阶段, 钻头切削和冲洗液冲刷使孔壁表层岩块松动; 发展阶段, 松动岩块在重力或流体冲刷作用下脱离母体, 形成局部空洞, 造成孔壁应力进一步集中; 失稳阶段, 空洞扩大导致连锁崩塌, 大量岩块涌入孔内, 形成塌孔事故^[1]。此外, 当冲洗液压力不足以平衡地层孔隙压力或地应力时, 孔壁的有效应力降低, 坍塌压力阈值下降, 加剧失稳。

1.3 水岩相互作用与化学-力学耦合效应

破碎岩层中地下水或冲洗液滤液与岩石矿物之间的相互作用是诱发塌孔的另一关键机制。对于含黏土矿物(如蒙脱石、伊利石、高岭石)的破碎地层, 水分子进入矿物晶层间或微裂隙中, 产生水化膨胀或分散, 使结构面润滑、强度骤降, 这种水化作用在力学上表现为膨

胀压力和软化效应。对于碳酸盐类破碎岩层, 冲洗液的 pH 值和离子成分可能引发溶蚀, 进一步扩大裂隙通道, 增加渗透性, 降低胶结强度。因此, 孔壁稳定不仅是单纯的力学平衡问题, 更是化学-力学耦合的复杂过程, 防治措施必须兼顾物理封堵与化学抑制。

1.4 塌孔的主要表现形式

根据现场观测, 破碎岩层钻进中的塌孔可归纳为三种基本形式: 剥落型, 表现为孔壁表层片状或小块状岩屑持续脱落, 孔径逐渐扩大, 岩屑堆积于孔底, 造成重复破碎和钻进困难; 突发型, 表现为大块岩体瞬间崩塌, 往往在起钻后或地层变化界面处发生, 极易卡埋钻具; 缩径型, 多见于富含膨胀性黏土矿物的破碎带, 吸水后体积膨胀导致孔径缩小, 提钻受阻或下钻不到底。三种形式有时混合出现, 加大处理难度。

2 影响塌孔的主要因素分析

2.1 地质因素的制约

地质条件是塌孔的内因和基础。岩性方面, 硬度低、脆性大或层理发育的岩石更易破碎坍塌; 构造方面, 断层带、节理密集带内岩体完整性最差, 坍塌压力最低; 地应力方面, 高应力区或应力各向异性显著区域, 孔壁应力集中程度更高, 坍塌风险增大; 地下水方面, 水压高、流量大的含水破碎带, 冲洗液漏失严重, 无法建立有效的液柱支撑, 极易诱发大面积塌孔。这些地质因素在钻前地质编录和邻近钻孔资料分析中应予以重点关注, 并据此制定针对性预案。

2.2 钻进工艺因素的诱发作用

钻进工艺参数对孔壁稳定具有直接调节作用。钻速过高时, 岩屑产出速率大于冲洗液携屑能力, 岩屑在孔底堆积, 使环空流道受阻, 产生局部负压抽吸效应, 引发孔壁松动; 钻压过大则使钻具弯曲振动加剧, 对孔壁产生周期性的敲击和刮削作用, 疲劳破坏结构面; 冲洗液排量过大, 对孔壁的冲刷侵蚀作用增强, 容易破坏胶结薄弱的颗粒间连接; 排量过小则不利于岩屑排出和孔底冷却, 亦会导致岩屑沉积堵塞^[2]。此外, 起下钻速度和操作规范性至关重要——起钻过快产生抽吸负压, 下钻过猛形成冲击波压力, 均可使破碎孔壁瞬间失稳。

2.3 时间因素的累积效应

破碎岩层中, 裸眼段的暴露时间与塌孔概率呈正相关关系。随着时间延长, 冲洗液滤液不断渗入裂隙, 水岩相互作用持续深化, 岩石强度逐渐劣化; 同时, 钻具起下和冲洗液循环的往复扰动累积作用于孔壁, 疲劳损伤不断加剧。许多现场事故表明, 塌孔多发生在停钻检

修、等待测井或长时间起钻之后, 正是时间累积效应的典型体现。因此, 缩短破碎地层裸眼段的暴露时间, 是减少塌孔事故的有效策略, 这与快速钻进和及时下套管等工艺措施直接相关。

3 钻进塌孔综合防治技术体系

3.1 钻前预测与稳定性分级评价

防患于未然是塌孔防治的首要原则。钻前应充分利用区域地质资料、物探解译成果及邻近钻孔实际资料, 对穿越破碎岩层的深度、厚度、岩性组成、构造产状、地下水赋存状态进行综合研判。在此基础上, 建立基于破碎程度、胶结状态和水敏性的孔壁稳定性分级标准, 将待钻地层划分为稳定层、一般破碎层、严重破碎层和极破碎层四个等级。建议按以下标准将待钻地层划分为四个稳定性等级: I 级(稳定层), $RQD > 75\%$, 无需特殊处理; II 级(一般破碎), $RQD = 50\% \sim 75\%$, 裂隙率 $< 3\%$, 以优化冲洗液为主; III 级(严重破碎), $RQD = 25\% \sim 50\%$, 裂隙率 $3\% \sim 8\%$, 须采用套管隔离或跟管钻进; IV 级(极破碎), $RQD < 25\%$, 裂隙率 $> 8\%$ 或伴有承压水, 须预灌浆加固后再行钻进。对不同等级提前储备相应器具和材料, 避免仓促应对。

3.2 冲洗液体系优化与护壁堵漏技术

冲洗液是维护孔壁稳定最直接、最灵活的手段。针对破碎岩层, 冲洗液设计应遵循“低滤失、适当密度、良好流变性和强抑制性”的原则。首先, 采用优质膨润土泥浆为基础体系, 添加降滤失剂(如羧甲基纤维素、磺化褐煤)以降低滤液渗透速率, 减少水化作用深度; 其次, 添加聚合物增黏剂(如聚丙烯酰胺、黄原胶)提升携屑能力和环空返速, 防止岩屑床形成; 再次, 针对水敏性破碎地层, 加入无机盐(如氯化钾、氯化钠)或有机抑制剂(如聚醚多元醇), 抑制黏土矿物水化膨胀^[3]。对于漏失严重的地段, 须配备随钻堵漏材料(如膨胀颗粒、纤维片、桥接堵漏剂), 一旦发现漏失迹象即加入堵漏浆液封堵裂隙通道, 恢复液柱支撑能力。

3.3 钻进工艺参数优选与操作规范

合理的钻进参数是减轻对孔壁扰动的关键。在破碎地层中, 应采用“低转速、低钻压、适当排量”的温柔钻进策略。具体参数应根据破碎程度和钻头类型动态调整, 原则是减少钻具振动和冲击, 维持平稳的钻压和扭矩。操作层面, 应严格规范起下钻速度, 一般控制在每米数十秒以上, 避免产生过大的压力激动; 提钻前应充分循环冲洗液, 确保孔内清洁; 下钻遇阻时严禁强力按压, 应开泵循环并缓慢回转通过。此外, 破碎地层段宜

尽量缩短每回次的进尺长度,增加提钻取心的频率,以减小裸眼段单次暴露时间。

3.4 套管护壁与跟管钻进技术

对于严重破碎层、流砂层或大漏失层,单纯依靠泥浆护壁往往难以奏效,必须采用机械物理支撑手段。常规方法是下入表层套管或技术套管,将破碎段隔离封闭,再在套管内进行后续钻进。但若破碎层深度较大且多层发育,多层套管结构会使钻孔口径逐级缩小,影响终孔直径。跟管钻进(如潜孔锤跟管钻进、双管钻进)则是一种更有效的解决方案,在钻进的同时将护壁套管同步跟进至破碎层底部,利用套管直接支撑孔壁,既保障了钻进连续性,又避免了塌孔风险。跟管钻进适用于浅-中深度破碎地层,对钻机能力和套管质量要求较高。

3.5 固结灌浆与化学加固技术

固结灌浆属于主动加固孔壁的技术方向。对于极破碎地层或采用套管难以彻底隔绝的情况,可在钻穿破碎带之前或之后注入水泥浆或化学浆液,使其渗入岩体裂隙和孔隙,胶结松散岩块,提高整体强度。预灌浆是在接近破碎层前提前注浆加固,形成人造“保护壳”后再行钻穿;后灌浆则是塌孔发生后补救处置的手段^[4]。近年来,化学注浆材料(如聚氨酯类、改性脲醛树脂)因其流动性好、凝固时间可控、强度增长快等优点,在破碎岩层护壁中逐渐得到应用,但其成本和对环境的潜在影响需综合评估。

4 防治技术的集成应用与适应性原则

以上各类技术并非相互排斥,而是互为补充。现场实践中,应当根据破碎层的地质特征和工程条件,进行“一孔一策、分段施治”的集成设计。对于仅有微裂隙的一般破碎层,以优化冲洗液和调整工艺参数为主;对于中等破碎层,需增加随钻堵漏和防塌添加剂,并控制裸眼暴露时间;对于严重破碎层,则须采用套管隔离或跟管钻进作为主力手段,同时配合泥浆护壁辅助;对于极破碎且伴有较大水头压力的地层,应优先采用预灌浆加固后再行钻进。经济性考量亦不可忽略——跟管钻进和灌浆成本较高,应权衡其与事故损失之间的效益平

衡,避免过度防护或防护不足两个极端。此外,现场管理对防治效果具有直接影响^[5]。应建立破碎层段的专项监控日志,记录钻进参数、冲洗液性能变化、岩屑返出情况、扭矩及泵压波动等,作为预判塌孔风险的前兆指标。一旦发现泵压陡降(漏失)、扭矩不稳、岩屑粒度突然变大或回次取心破碎加剧等预警信号,应立即停钻循环或提钻检查,及时采取补救措施,防止小异常演化为大事故。

5 结语

破碎岩层钻进塌孔是探矿工程中面临的最具挑战性的技术难题之一,其本质是多场耦合作用下的孔壁力学失稳与水化劣化综合结果。本文通过系统分析塌孔的机理、影响因素和现有防治手段,提出综合防治技术体系的构建思路,强调从钻前预测、冲洗液调控、工艺优化、套管支撑和灌浆加固等多维度协同施治,并根据破碎程度进行分级响应。需要指出的是,没有任何一项单一技术可以包治百病,成功的防治依赖于对地层条件的准确判断、技术手段的合理组合以及现场操作的精细管理。当前,随着深部找矿需求增加,深孔破碎地层钻进将面临更高的地温和地应力条件,对防塌技术提出更高要求。未来发展方向可关注智能泥浆调控系统、高性能化学护壁材料、低扰动钻进技术以及数字化实时预警平台的建设。但无论技术如何进步,扎实的地质分析和严谨的现场执行力始终是防治塌孔的根基所在。

参考文献

- [1] 张金昌,刘凡柏,黄洪波.复杂地层钻探护壁堵漏技术研究进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2022,49(3):1-9.
- [2] 孙友宏,王清岩,郭威.破碎岩层孔壁稳定性评价与泥浆体系设计[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(4):1202-1212.
- [3] 蒋国盛,乌效鸣,潘秉锁.聚合物冲洗液在破碎地层中的应用研究[J].地质科技情报,2023,42(2):278-285.
- [4] 鄢泰宁,姚爱国,吴翔.跟管钻进技术在复杂地层钻探中的应用进展[J].煤田地质与勘探,2022,50(6):145-153.
- [5] 夏柏如,李国民,刘宝林.注浆加固技术在钻探塌孔防治中的应用综述[J].岩土工程学报,2021,43(增刊2):87-93.