

复杂地质环境下金属矿山开采施工技术研究

宋来旭 张阳阳

洛阳坤宇矿业有限公司 河南 洛阳 471000

摘要：复杂地质环境给金属矿山开采带来诸多挑战，影响开采安全与效率。本文剖析了复杂地质环境特点，如地质构造复杂、岩体质量差异大、水文地质多变等，及其对钻爆、采掘、支护、通风排水等施工环节的挑战。详细阐述了钻爆、采掘、支护及通风排水等施工技术，包括预裂爆破、分层分阶段开采、多层次支护体系构建等，旨在为复杂地质环境下金属矿山安全高效开采提供技术参考。

关键词：复杂地质环境；金属矿山开采；施工技术

引言

金属矿山开采是获取金属资源的关键途径，对工业发展意义重大。然而，许多金属矿山处于复杂地质环境，存在断层破碎带、高应力围岩、涌水突泥等问题，矿体形态不规则、分布零散。这些复杂地质条件使开采面临诸多难题，如钻爆作业难控制、采掘过程岩体易失稳、支护体系设计受限、通风排水系统构建困难等，严重影响开采安全与效率。因此，研究复杂地质环境下金属矿山开采施工技术十分必要。

1 复杂地质环境对金属矿山开采的影响

在金属矿山开采进程中，复杂地质环境会引发一系列不利状况，对开采作业造成多维度阻碍。断层破碎带是复杂地质环境中的典型特征，其存在极大地削弱了围岩的稳定性。在开采扰动下，围岩极易失稳，进而引发顶板垮落、巷道严重变形等安全事故。这不仅严重威胁到井下作业人员的生命安全，还使得支护工作难度剧增，支护成本也大幅攀升。高应力围岩同样给开采带来巨大挑战。在开采活动开展时，高应力围岩会因应力释放而产生岩爆现象。岩爆发生时，岩石以高速弹射的形式迸出，对开采设备造成严重损坏，同时对现场人员的人身安全构成直接且严重的威胁。且岩爆会破坏矿体的原有结构，导致矿体完整性受损，使得资源回收难度增大，回收效率降低。水文地质问题在复杂地质环境下也较为突出，涌水突泥现象时有发生。在矿山作业里，大量涌水堪称“头号大敌”。如果发生，井下会迅速积水，如洪水猛兽般阻碍施工正常推进，让原本紧凑的施工进度无奈延迟。若不能及时有效控制涌水，后果不堪设想，淹井等重大灾难性事故随时可能爆发，不仅危及人员生命安全，还会使排水系统超负荷运转，能耗大幅攀升；复杂地质条件下的矿体形态极不规则，好似天女散花般分布零散。这给开采方案的设计与实施出了道

“难题”，科学规划难上加难，开采过程也变得混乱无序，难以实现高效作业。最终，开采效率低下，大量宝贵资源被白白浪费，严重制约着矿山的可持续发展。

2 复杂地质环境特点及对开采施工的挑战

2.1 复杂地质环境特点

复杂地质环境在构造形态、岩体属性及水文特征上呈现显著特殊性。地质构造层面，断层交错分布且褶皱形态多样，导致岩体完整性被严重割裂，形成大小不一的破碎块体。这类构造不仅改变岩体原有受力状态，还可能成为地下水运移的通道，加剧地质条件的不稳定性。岩体质量方面，普遍存在软弱夹层与风化带，前者多由黏土岩、页岩等低强度岩层构成，遇水易发生软化崩解；后者因长期风化作用导致岩体结构疏松，抗压与抗剪强度大幅下降。不同区域的岩体质量差异明显，同一开采区域内可能出现从完整岩体到极破碎岩体的剧烈变化，增加了地质条件的复杂性。水文地质条件的多变性特征十分明显，地下水的赋存状况与地质构造关联紧密。断层带及裂隙密集的区域，往往因岩体破碎、渗透性强而形成富水段；而在岩体完整的区域，由于裂隙不发育，地下水则可能较为匮乏，呈现出明显的分布差异。在矿山开采的征程中，部分区域潜藏的溶洞、暗河等特殊水文构造宛如“隐形炸弹”。它们分布极为隐蔽，深埋于地下难以察觉，且导水性能超强。在开采时未提前精准探测发现，突水事故便会瞬间爆发。汹涌的水流如脱缰野马，迅速干扰正常的开采作业，让原本有序的生产陷入混乱；大量涌水还会恶化地质环境，使原本复杂的地质状况雪上加霜，给矿山开采带来重重困难与巨大挑战，严重威胁着开采工作的安全与顺利进行^[1]。

2.2 对开采施工的挑战

(1) 在复杂地质条件下，钻爆作业犹如在荆棘丛中前行，面临着重重挑战。破碎岩体抗爆特性离散，

就像一群毫无秩序的“散兵游勇”，让爆破能量四处散射，难以掌控。这直接导致爆破轮廓失控，岩面坑洼不平，大块石和根底残留现象严重。二次破碎工作量因此大幅增加，如同给本就繁重的作业又压上了一座大山。更严峻的是，爆破振动会加剧岩体破碎，像打开了灾害的“潘多拉魔盒”，滑坡、坍塌等次生地质灾害随时可能发生，严重威胁着矿山施工安全，也让开采效率大打折扣。创新技术手段迫在眉睫，以化解这些棘手难题。

(2) 在复杂地质环境的金属矿山开采中，采掘工程面临严峻的岩体稳定性挑战。软弱夹层发育区域成为事故高发地带，掌子面及巷道围岩极易发生冒顶片帮事故。在自重应力与扰动荷载的双重作用下，局部岩体失稳风险剧增，直接威胁井下作业人员的生命安全，还会导致施工周期被迫延长。频繁的岩体失稳更使得支护修复成本大幅攀升，严重影响矿山开采的经济效益与工程进度。

(3) 支护体系设计需平衡材料属性与结构形态，传统刚性支护难以应对大变形岩体，柔性支护在高应力环境下则显现承载能力不足的问题。通风系统易受地质构造影响，在断层、溶洞等区域常发生风流紊乱与短路，导致有害气体聚集。排水系统因地下水位起伏大，富水与贫水区域交替出现，使得排水设备频繁启闭，缩短设备使用年限，还加大井下积水隐患与运营开销^[2]。

3 复杂地质环境下金属矿山开采施工技术

3.1 钻爆技术

复杂地质环境中，钻爆技术的精准应用直接影响开采效率与岩体稳定性。预裂爆破技术通过在主爆破前的设计开挖边界处，钻凿密集排列的炮孔并装入少量炸药实施爆破，可形成一道贯穿性裂缝。这道裂缝能有效阻隔主爆破产生的冲击波向保留岩体传递，大幅降低对周边岩体的扰动，尤其适用于断层发育区域的边界控制。光面爆破则在主爆破完成后，对开挖轮廓进行二次精细爆破，通过严格控制炮孔间距、装药量及起爆顺序，使开挖面形成平整光滑的岩面，减少超挖与欠挖现象，降低后续支护作业的难度。针对不同岩体性质，炸药类型的选择需差异化适配。在坚硬岩体中，需选用高爆速炸药，以此保证破碎效果达到预期；而在软弱夹层发育的区域，为避免过度爆破引发岩体坍塌，应采用低感度炸药。装药结构上，间隔装药与不耦合装药技术的运用是提升爆破效能的关键。在金属矿山爆破开采中，合理调控药包相关参数对提升爆破效果、适应复杂地质环境意义重大。调节药包间距离与药径配比，能使炸药释放的能量在岩体中均匀分布。如此，可有效避免能量集中造成过度破坏，提高能量利用效率，让爆破能量更精准

地作用于岩体，实现高效破碎；要依据岩体完整性参数对爆破参数进行动态优化。在破碎带区域，岩体稳定性差，若采用常规爆破参数，易引发安全事故。此时缩小炮孔间隔、降低单次起爆药量，既能保证对破碎岩体的有效破碎，又能减少对周边岩体稳定性的破坏。复杂地质时，以机械动力筑基，构建多层次、全方位立体通风网络。

3.2 采掘技术

(1) 复杂地质环境中的金属矿山开采，需依照岩体稳定性分级和开采深度变化，运用分层分阶段开采技术。该技术将矿体划分为多个独立的分层与阶段单元，按自上而下或自下而上的顺序逐步推进。通过限定单次开采的规模，能有效控制对围岩的扰动程度。这种开采方式在高应力与断层发育区域效果尤为突出，可减少因大规模开采引发的岩体失稳，保障开采过程的安全性，同时有利于提高资源回收效率，适应复杂地质条件下的开采需求。(2) 在复杂地质环境的金属矿山采掘作业里，顶板管理是保障安全生产的关键。构建超前探测与支护协同体系，借助管棚支护、小导管注浆等超前加固方法，对掌子面前方破碎岩体预先处理，能切实增强岩体稳定性；利用液压临时支护设备，对暴露的顶板进行实时支撑，形成双重防护结构。这种方式可明显降低顶板坍塌的可能性，为矿山实现安全高效开采筑牢坚实防线，确保采掘作业在复杂地质条件下有序推进。(3) 针对破碎岩体区域，采用浅孔落矿工艺，通过减小炮孔深度与直径，精准控制爆破影响范围，防止爆破振动诱发岩体失稳；出矿环节依据采场空间条件，灵活选用电耙或无轨铲运机设备，在保障出矿效率的同时，降低机械作业对底板岩体的破坏；采场参数设计需基于岩体力学特性进行动态优化，于节理发育区域缩小采场跨度、增大矿柱密度，通过结构参数的合理调整，实现采掘效率提升与施工安全保障的有机统一。

3.3 支护技术

在复杂地质环境下，支护技术是保障岩体稳定、确保矿山开采安全的关键核心。构建多层次支护体系是应对不同岩体条件的有效策略。锚杆支护作为其中重要环节，发挥着关键作用。它借助高强度金属杆体植入岩体内部，凭借杆体与岩体间的摩擦力以及锚固力，巧妙地将表层那些不稳定岩体和深部稳定岩体紧密联结在一起，形成具有整体性的承载结构，有效增强岩体自身稳定性，为后续开采作业筑牢安全根基。在断层破碎带，采用全长黏结型锚杆配合树脂锚固剂，可快速发挥支护作用，阻止岩体沿裂隙面滑移。锚索支护则适用于高应

力区域，通过高强度钢绞线深入岩体深部稳定层，施加预紧力形成大范围承载拱，有效控制岩体的大变形趋势，其支护深度与承载能力远优于普通锚杆。喷混凝土支护通过高压喷射设备将混凝土混合料均匀覆盖于岩体表面，形成连续的刚性保护层，能隔绝地下水对岩体的侵蚀，还可与岩体共同承载，提高表层岩体的抗剪强度。在极破碎岩体支护场景中，钢支架与喷混凝土联合支护优势明显。钢支架能迅速提供刚性支撑，抵御岩体变形；喷混凝土可填充钢支架和岩体间的空隙，二者形成复合承载结构，极大增强支护体系整体刚度。实际应用时，要依据岩体完整性指数和应力监测数据，对支护参数进行动态优化。比如在软弱夹层区域，适当增加锚杆密度、加厚喷混凝土层，能让支护强度与岩体条件高度适配，保障支护效果^[3]。

3.4 通风排水技术

(1) 复杂地质条件下，通风系统构建要以机械动力为核心，打造立体化网络架构。通过合理布置机械通风设备，结合巷道走向与地质构造，形成多层次通风路径，确保风流覆盖各作业区域，应对复杂地形带来的通风难题。依据巷道空间布局与地质构造形态，采用抽出式与压入式联合通风方案，通过主通风机经风井与主干巷道构建主风流通道，保障井下作业区风量稳定供给。针对断层分隔形成的孤立采区，部署局部通风机配合柔性风筒定向导风，消除通风盲区；在易产生风流短路的溶洞、裂隙区域，于关键节点设置风窗与风门，通过动态调节风压和风量分配，确保各作业面风速达标、有害气体浓度受控，实现爆破后瓦斯与粉尘的高效排出。

(2) 排水系统设计需紧密依托水文地质探测数据，构建多级接力排水体系。在井下涌水源头设置集水仓，利用潜水泵将积水抽送至中间转水站，再通过高扬程水泵完成地面排放，形成阶梯式排水链路。对于富水断层带，

在巷道掘进前实施超前注浆堵水工艺，借助速凝浆液封堵导水裂隙，从源头削减井下涌水量。(3) 在排水系统建设方面，采用智能监测与复合排水技术。通过配置水位自动监测装置，利用传感器实时采集数据并传输至监控系统，经数据分析模型精准预判水位变化。根据涌水量智能调控水泵数量，既满足排水需求，又避免设备空转耗能，提升运行效率。针对溶洞发育区，创新运用排水钻孔与导水廊道结合方案，排水钻孔深入地下引流，导水廊道有序汇流外排，构建完整排水网络，大幅降低突水风险，营造稳定干燥的作业环境，为矿山安全高效开采筑牢排水保障^[4]。

结束语

复杂地质环境下的金属矿山开采是一项极具挑战性的工作。通过对复杂地质环境特点及其对开采施工挑战的分析，明确了各施工环节面临的问题。而钻爆、采掘、支护及通风排水等施工技术的合理应用与创新，为应对这些挑战提供了有效途径。在实际开采中，需根据具体地质条件，灵活运用并不断优化这些技术，实现开采的安全、高效与经济，推动金属矿山开采行业的可持续发展。

参考文献

- [1] 赵桂英,张佑铭,张洋,孙骏,张娟,王磊.云南省金属矿山开采的环境问题及保护研究[J].中国矿业,2025,34(S1):47-51.
- [2] 郑明艺.复杂条件下的铜多金属矿山露天综合开采技术[J].冶金与材料,2025,45(5):186-188.
- [3] 赵文宝.复杂地质环境下金属矿山开采施工技术研究[J].工程机械与维修,2024(6):68-70.
- [4] 严雪姣.复杂地质下金属矿山尾矿库安全施工技术研究[J].矿业装备,2024(5):4-6.