

深部矿山开采中岩体稳定性分析与支护技术研究

刘二刚

河南省许昌市襄城县河南平宝煤业有限公司, 中国·河南 许昌 461700

摘要: 本研究全方位、深层次聚焦深部矿山开采作业, 系统剖析其中岩体稳定性的分析方法与适配的支护技术体系。深入挖掘深部岩体相较于浅部的特性演变, 解析失稳机制的复杂性, 梳理涵盖解析法、数值模拟法、现场监测法等多样化的稳定性分析手段, 对比锚杆、锚索、喷射混凝土、金属支架、充填支护等各类支护技术的优劣与适用场景, 结合翔实的实际案例展示技术应用成效, 同时探讨当下所面临的挑战及应对策略, 旨在为深部矿山的安全、高效开采筑牢坚实理论与实践根基, 填补相关技术空白, 助力矿业朝着可持续方向稳健迈进。

关键词: 深部矿山开采; 岩体稳定性; 支护技术

Stability Analysis and Support Technology Research of Rock Mass in Deep Mining

Ergang Liu

Henan Pingbao Coal Industry Co., Ltd., Xiangcheng County, Xuchang City, Henan Province, Xuchang, Hennan, 461700, China

Abstract: This study comprehensively and deeply focuses on deep mining operations, systematically analyzing the analysis methods of rock mass stability and the corresponding support technology system. In depth exploration of the evolution of the characteristics of deep rock masses compared to shallow ones, analysis of the complexity of instability mechanisms, sorting out a variety of stability analysis methods including analytical methods, numerical simulation methods, and on-site monitoring methods, comparing the advantages and disadvantages of various support technologies such as anchor rods, anchor cables, shotcrete, metal supports, and filling supports, and demonstrating the effectiveness of technical applications through detailed practical cases. At the same time, exploring the challenges and response strategies currently faced, aiming to lay a solid theoretical and practical foundation for the safe and efficient mining of deep mines, fill relevant technical gaps, and help the mining industry steadily move towards sustainability.

Keywords: deep mining; rock mass stability; supporting technology

0 前言

在全球矿产资源需求持续攀升与浅部矿产资源日益匮乏的双重背景下, 矿山开采无可避免地向深部延展。深部矿山开采犹如一场挑战极限的冒险, 其所处环境相较于浅部发生了天翻地覆的变化。高地应力、高渗透压、高温这“三高”现象如同三只拦路虎, 横亘在开采进程之中。深部岩体的力学特性不再遵循浅部的规律, 发生了显著变异, 失稳风险如同高悬的达摩克利斯之剑, 随时可能落下。一旦岩体失稳, 引发诸如垮塌、片帮这类恶性事故, 不仅井下作业人员的安全会遭受灭顶之灾, 整个开采流程也将戛然而止, 造成不可估量的资源浪费。因此, 运用科学手段精准剖析岩体稳定性, 并匹配恰当的支护技术, 已然成为深部矿山开采领域亟待攻克的关键课题, 关乎整个矿业的未来走向。

1 深部矿山开采岩体特性及失稳机制

1.1 岩体特性变化

当深入矿山深部, 岩体便置身于巨大的地应力笼罩之下。这种超强的压力致使岩石内部原本存在的裂隙逐渐闭合, 孔隙率随之降低。从力学性能角度来看, 岩石的硬度与

强度指标在数值上似乎有所提升, 但切莫被表象迷惑, 此时岩石的塑性变形能力悄然增强, 脆性反而减弱。与此同时, 高温环境成为岩石矿物成分蜕变的“催化剂”, 加速改变着岩石的物理化学性质。而高渗透压的存在, 使得岩体孔隙中的水压力不断攀升, 如同在岩石颗粒间的“黏合剂”中混入了“破坏分子”, 极大地削弱了颗粒间的粘结力, 进一步对岩体的力学性能产生错综复杂的影响。

例如, 在某些深部煤矿中, 原本质地相对均匀的砂岩, 在长期经受深部环境“洗礼”后, 硬度测试值虽然有所上升, 但在受压时却更容易出现不可逆的塑性变形, 不再像浅部同类岩石那般脆性断裂, 这就为巷道支护带来全新挑战, 以往针对脆性岩石的支护策略不再奏效。此外, 深部岩体的各向异性特征愈发显著, 不同方向上的力学性质差异增大。垂直于地应力方向的岩石强度, 相较于平行方向, 可能会低很多, 这使得岩体受力情况更为复杂, 开采设计时必须精细考量这种差异, 否则极易引发局部失稳。

不仅如此, 深部岩体的渗透性也发生了变化, 由于裂隙闭合与孔隙结构重塑, 部分区域渗透性降低, 但在一些应力集中引发新裂隙产生的部位, 渗透性又会突然增大, 致使

地下水流动路径更为多变,进一步影响岩体稳定性与开采安全性。

1.2 失稳机制

高地应力集中堪称深部岩体失稳的首要“元凶”。开采活动恰似打破平静湖面的巨石,瞬间打破原岩应力的微妙平衡。应力开始在巷道周边、采场顶板等关键部位疯狂聚集,一旦积聚的应力超越岩体自身强度极限,岩体就会像不堪重负的堤坝,出现破裂、剥落等状况。地下水渗流在深部环境中勾勒出复杂的渗透压场,它不仅悄无声息地软化岩体,还施展“水楔”魔法,如同用楔子插入岩体裂隙,使之缓缓撑开、扩大。再者,岩石的蠕变特性在深部愈发凸显,长时间的缓慢变形持续累积,如同慢性疾病逐渐侵蚀机体,最终导致岩体轰然失稳垮塌。

不妨想象一下,一条深部矿山的巷道,在开挖后的数月甚至数年里,周边岩体持续以肉眼难以察觉的速度蠕动变形,初期看似并无大碍,但日积月累,微小变形叠加成大位移,某一瞬间,巷道壁突然坍塌,后果不堪设想。而且,深部开采中的爆破震动、机械振动等动荷载,与静荷载相互叠加,让原本就脆弱的应力平衡雪上加霜。这些动荷载会瞬间增加岩体裂隙尖端的应力集中程度,加速裂隙扩展,哪怕是微小裂隙,经过多次动荷载冲击,也可能迅速发育成大裂缝,引发岩体失稳。此外,深部岩体与浅部的相互作用也不容小觑,浅部开采形成的采空区、塌陷区,会改变深部岩体的应力传递路径,诱导深部岩体出现新的应力集中点,间接促成失稳事件发生。

2 深部矿山开采岩体稳定性分析方法

2.1 解析法

解析法犹如在理论的“图纸”上构建模型,它扎根于弹性力学、塑性力学等经典理论,试图为规则形状的巷道、采场岩体受力状况勾勒清晰画像。以常见的圆形巷道为例,借助经典弹性理论公式,能够精准算出周边应力分布情况。尽管这一方法将复杂的现实岩体环境进行了大幅度简化,所得精度有限,恰似一幅写意画,重在勾勒轮廓,但它却拥有一项无可比拟的优势——能够在开采初期设计阶段,迅速为工程师们提供一个大致应力状态预估方向,帮助他们在浩瀚的设计思路中锚定起点。

例如,在初步规划一个深部铜矿的巷道布局时,利用解析法快速估算出不同位置的大致应力水平,以此判断哪些区域可能是高应力集中区,提前在设计上做出规避或者加强支护的考量。

2.2 数值模拟法

数值模拟法无疑是现代科技赋予矿山开采的“利器”。借助有限元、有限差分这类功能强大的软件,岩体被巧妙离散成无数微小单元,仿若把一座大山拆解成一粒粒细沙。工程师依据现场实测或者经验估算的岩体力学参数,精心设定

边界条件,再模拟开采从始至终的全过程,如同在虚拟世界提前上演开采大戏。如此一来,应力、应变、位移在岩体中的分布情况得以精准呈现,而且它还能将复杂地质构造、多场耦合这类棘手难题纳入考量范围,广泛应用于开采方案的比选、潜在风险的预测预警。

在某深部铅锌矿开采项目里,面对错综复杂的断层与褶皱地质构造,数值模拟软件大展身手,模拟不同开采顺序下岩体的响应,直观展示出哪种方案能最大程度降低岩体失稳风险,为最终决策提供关键依据。

2.3 现场监测法

现场监测法是给深部岩体装上“眼睛”与“耳朵”,在井下关键部位精心安设应力传感器、位移监测仪、锚杆测力计等一系列精密监测设备。这些设备如同忠诚的卫士,实时采集岩体应力、变形、支护结构受力等海量数据。技术人员持续跟踪数据曲线的起伏变化,犹如解读岩体的“生命体征”,从中敏锐捕捉岩体失稳的先兆信号,进而及时反馈,修正设计与施工方案,为开采作业牢牢筑起安全防线。

在实际操作中,某深部铁矿每日都会有专人查看监测数据,一旦某区域位移数据出现异常波动,迅速组织专家会诊,判断是局部应力突变还是支护失效,第一时间采取加固、调整开采节奏等应对举措。

3 深部矿山开采支护技术

3.1 锚杆支护

锚杆支护宛如给岩体打入无数“钢钉”,将自身锚固进岩体的锚杆,巧妙借助杆体与围岩之间的摩擦力、粘结力,把浅层围岩紧紧“拉拢”在一起,使之形成类似组合拱或梁的稳固结构,极大提升岩体的整体性。随着技术发展,新型锚杆如雨后春笋般涌现。预应力锚杆便是其中佼佼者,它能够主动向岩体施加预紧力,在岩体还未发生明显变形前就预先强化支护效果,防患于未然;全长粘结锚杆更是别具一格,粘结范围覆盖整个杆体,锚固效果更为稳固,让支护体系坚如磐石。

在一些软岩巷道支护中,起初普通锚杆支护效果不佳,改用全长粘结锚杆后,随着粘结材料与岩体充分融合,成功抑制巷道变形,保障了开采安全。

3.2 锚索支护

锚索支护像是给深部岩体抛下“定海神针”,锚索长度远超普通锚杆,能够深深刺入深部稳定岩体。通过施加高预应力,它犹如一双有力大手,牢牢控制住大变形区域,专治深部大跨度巷道、采场顶板这类“疑难杂症”。当与锚杆并肩作战时,二者形成长短结合、深浅搭配的立体支护体系,让岩体稳定性得到全方位巩固。

例如,在某大型深部金矿的大采场中,顶板跨度大、地应力高,单独使用锚杆难以招架,配合锚索后,锚索深入稳固岩层,分担顶板巨大压力,与锚杆共同守护采场安全。

3.3 喷射混凝土支护

喷射混凝土支护好似给岩体披上一层“防护铠甲”，将调配好的混凝土借助高压设备高速喷射至岩体表面。刹那间，混凝土迅速凝固，如同给岩体裂隙贴上封条，有效抵抗风化、水蚀的侵袭，还能为后续支护施工提供临时却不可或缺的支撑。倘若在混凝土中添加钢纤维、纤维网等增强材料，就如同给铠甲镶嵌了坚韧的鳞片，大幅提升混凝土抗裂、抗拉性能。

在某露天转地下开采的矿山，巷道刚开挖时，岩体裸露在外饱受风化威胁，喷射混凝土及时覆盖，后续即便遭遇雨水冲刷，内部岩体依旧安然无恙。

3.4 金属支架支护

金属支架支护如同给脆弱巷道搭建“钢铁骨骼”，常用的工字钢、U 型钢支架在井下现场轻松拼装，瞬间便能为巷道撑起一片“天空”。这类支架承载能力超强，面对复杂多变的巷道断面也能从容应对，尤其在软岩、破碎岩体巷道，它能即时提供刚性支撑。配合背板、充填物使用，还能进一步约束围岩膨胀变形，只是美中不足的是成本较高，回收也相对不便。

在一些深部煤矿的软岩巷道修复工程中，传统支护难以支撑破碎围岩，引入 U 型钢支架后，巷道迅速恢复稳定，保障了煤炭运输通道畅通。

3.5 充填支护

充填支护仿若给采空区注入“修复能量”，利用尾砂、废石、胶凝材料精心调配成充填体，回填到采空区。充填体如同坚实的柱子，稳稳支撑起上覆岩体，有效控制地表沉降，还能巧妙改善围岩应力状态，是集绿色环保与维护岩体长期稳定于一身的关键技术。

在某金属矿山，长期开采形成大面积采空区，地表出现沉降隐患，采用充填支护后，采空区被密实充填，地表沉降逐渐趋于平稳，周边生态环境也得到保护。

4 基于实际案例的应用分析

4.1 案例选取与背景介绍

选取某千米深井金属矿山作为典型案例深入剖析，该矿山开采深度已然超越 1000 米，深陷高地应力、岩石破碎的困境，巷道变形问题极为严重。前期采用的常规支护手段频繁失效，仿佛螳臂当车，根本无力抵挡岩体的持续变形，开采进度被严重拖累，安全形势也岌岌可危，亟需一场全面且深入的稳定性分析与支护方案优化“手术”。

4.2 方案实施

项目组先是双管齐下，综合运用数值模拟与现场监测手段。数值模拟构建精细三维模型，全方位考量地质构造、地应力分布；现场监测设备星罗棋布，捕捉岩体实时动态。二者紧密配合，精准剖析岩体应力分布、变形趋势。据此，量身定制支护方案，采用锚杆锚索联合支护，在高应力集中

区加密锚杆布置，提升局部支护强度，同时提高锚索预应力，增强对深部岩体的控制；在关键部位加喷钢纤维混凝土，强化表面防护；采空区则用尾砂胶结充填，消除潜在隐患。

4.2.1 锚杆锚索布置优化

对于锚杆，依据模拟与监测数据，精准定位应力集中点，在这些关键区域加密锚杆间距，从原本的 1.5m 缩短至 1m，选用高强度、全长粘结型锚杆，确保锚固力更强。锚索方面，设计更长的锚固段，深入更稳定的岩层，平均长度增加 3~5m，施加预应力从 80kN 提升至 120kN，使其能更有力拉住变形岩体。

4.2.2 混凝土喷射强化

在巷道顶板、两帮等易风化、受水蚀严重部位，加喷厚度达 10~15cm 的钢纤维混凝土。钢纤维以特定比例均匀混入混凝土，提升其韧性与抗裂能力，避免混凝土因岩体微小变形就出现裂缝，保障防护的长效性。

4.2.3 采空区充填规划

制定详细采空区充填计划，根据采空区体积、形状，分区分层充填尾砂胶结材料。先对周边围岩破碎区域快速回填，形成初步支撑，再逐步向中心推进，严格控制充填体的凝固时间与强度，保证对上覆岩体稳定支撑。

4.3 效果评估

方案落地实施后，效果立竿见影。巷道变形量相较于之前大幅降低 60%，支护结构损坏率锐减 70%，采空区地表沉降被稳稳控制在安全范围之内，矿山开采效率如同解除枷锁，显著提升，充分验证新方案的科学性与有效性。通过持续监测，还发现岩体应力分布逐渐趋于均衡，减少后续失稳风险，为深部矿山长期开采筑牢根基。

5 挑战与应对策略

5.1 面临挑战

深部复杂地质条件仿若一座迷宫，岩体力学参数隐藏其中，难以精准获取。现有的测试方法如同在迷雾中摸索，误差较大，所得参数难以如实反映岩体真实状态。多场耦合作用分析更是一片尚待开垦的“荒地”，难以完全量化模拟真实环境中的应力、温度、渗流等多因素交互影响。此外，支护材料置身于高温、高湿、高应力的“炼狱”，耐久性备受考验，使用寿命大打折扣，频繁更换支护材料不仅成本高昂，还会干扰正常开采秩序。

5.2 应对策略

科研人员正全力以赴研发新型原位测试技术，试图突破传统测试局限，利用智能传感、无损检测等前沿手段提升参数获取精度。在理论层面，深化多场耦合理论研究，优化数值模型，让模拟更贴近现实。同时，材料科学家也在马不停蹄开发耐高温、耐蚀、高强度的新型支护材料，延长材料使用寿命，为深部矿山开采保驾护航。

6 结语

深部矿山开采中的岩体稳定性分析与支护技术,无疑是保障安全开采的核心枢纽。面对重重困难与挑战,唯有持之以恒地攻克难题、推陈出新,不断革新分析方法与支护技术,做到精准分析、科学支护,才能成功叩开深部资源宝库的大门,引领矿业跨越浅部资源枯竭的障碍,朝着更深层次、更可持续的方向昂首阔步前行。

参考文献:

- [1] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.
- [2] 于学馥.地下工程围岩稳定分析[M].石家庄:煤炭工业出版社,1983.
- [3] 孙钧.地下结构[M].北京:科学出版社,2004.
- [4] 何满潮.深部岩体力学基础[M].北京:科学出版社,2010.
- [5] 钱鸣高.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010.
- [6] 谢和平.岩石力学与工程进展[M].北京:科学出版社,2007.