

# 深部矿业开采的岩石力学问题及应对策略探究

刘永强

中煤科工开采研究院有限公司 北京朝阳 100013

**摘要：**随着浅层矿产资源的逐步减少，深部矿业的开采已经变成了确保资源供应的策略选择。但深部高地应力，高温和强渗透压的复杂环境诱发了围岩的大变形，岩爆，热破坏以及突涌灾害等一系列岩石力学难题，严重威胁着开采的安全和效益。文章对深部开采所面临的岩石力学难题进行了系统分析，提出了有针对性的对策，主要有优化支护设计，加强热环境调控，健全监测预警体系和水害防控技术等，以期对深部资源的安全，高效开发起到理论支撑和技术参考。

**关键词：**深部矿业开采；岩石力学问题；高地应力

## 引言

在全球资源需求不断增长的背景下，深部矿业开采是获得深埋资源的一种重要方式。但复杂的深部开采环境及岩石力学问题给矿井安全及生产效率带来了严重的威胁。文章旨在通过对深部矿业开采过程中所遇到的岩石力学问题进行探究，提出应对策略，为深部矿业开采工作提供理论指导与技术支持。

## 一、深部矿业开采的战略意义与发展趋势

在地表资源逐渐枯竭、浅部矿产开发日趋饱和的情况下，深部矿产资源日益成为维系我国资源供给安全、工业持续发展至关重要的战略储备。尤其在能源结构转型、新材料产业迅速发展的大环境中，高品质矿产资源需求量大增加，迫使矿业技术由浅层开采转向千米级深部开采。这一变革既代表资源利用方式提升，又表明矿业工程已步入多场耦合，风险大，强度高的新时期。目前我国几个典型矿区深度已经超过千米，例如鞍本，冀中，华亭地区深井开采已经进入常态化开采阶段，相关技术，支护方式以及灾害控制模式正在演变。但深部环境所引起的地应力异常，热动力作用加剧以及地下水渗透的复杂性等系列岩石力学问题正形成深部资源开发效率与安全的主要瓶颈<sup>[1]</sup>。所以，理清这些问题产生的原因及演化规律，找到更有针对性的控制技术路径不仅有明显的工程实践价值而且对于矿业科技进步及矿区安全保障体系建设也有促进作用。

**作者简介：**刘永强，1988年生，男，内蒙古凉城人，硕士研究生学历，主要从事围岩控制及灾害防治工作。

## 二、深部矿业开采的岩石力学问题

### 1. 高地应力诱发围岩大变形与岩爆

进入千米深井后，由于原岩应力水平剧增，使岩体受到的地应力大大超过了其结构强度限制，致使围岩受开采扰动极易产生应力重分布及脆性破坏。该过程在实际工程中常以巷道急剧变形、局部支护系统破坏、甚至诱发严重岩爆事件等形式出现。岩爆产生的主要原因是应力的累积超出了能量释放的临界值，这导致了动态的卸载和冲击波的产生，特别是在高强度的脆性岩层中这一现象更为明显。相对于浅部矿区而言，深部岩爆发生的频度较高，强度较大，且在空间上的分布也较具有不确定性，给作业人员的生命安全带来了直接的威胁。特别是复杂构造带或者地质断裂发育的地区，地应力走向不均匀，很容易产生局部高应力集中区而诱导瞬时破坏。另外，深部工程大变形问题不容忽视，高应力下软岩会发生蠕变、压溃等变形，并形成“膨胀—压缩—失效”非线性演化路径，支护结构需要有较好的适应性及动态调节能力，否则很难保持工程的稳定性。

### 2. 高温环境导致岩体热破坏与力学性能退化

深部开采既面临着高地应力的挑战，又伴有明显的地温上升。在1000米的深度以下，岩石的温度普遍高于45℃，有些矿区的温度甚至接近或超过了60℃。长时间处在高温状态的岩体必然会发生物理力学性质的改变。试验研究表明：当岩石温度较高时，由于微裂隙的增多和结构完整性的降低，特别是热应力的循环作用可诱发岩体的“热疲劳”，由此导致其抗压强度，剪切强度和弹性模量的系统性衰减。这一劣化过程在弱化围岩稳定性的同时，还会加大围岩随着时间推移向不稳定体演化的

危险性。工程实际中高温作用也往往会造成支护材料的性能劣化和施工机械效率的下降,甚至会对通风系统的工作造成影响,从而产生恶性循环。值得关注的是热和力场的耦合作用更加复杂<sup>[2]</sup>。在一定条件下岩体受热膨胀体积膨胀可诱导初始裂纹开启,使应力重分布并由此诱导出新的破坏面。

### 3. 地压活动频繁引发顶板垮落与巷道失稳

深部矿井地压频繁活动的根本原因是地应力重分布与地质构造影响综合作用导致岩层非线性移动与重建。该活动性可直接诱导顶板结构的破坏,轻者引起巷道的局部塌方,重者可导致大面积垮落和设备掩埋事故的发生。受开采扰动作用,原稳定岩层体系内会出现剪切裂隙,张裂带或者压溃区等破坏模式,从而导致复杂破坏。特别是在顶板岩层层状,破碎或者节理发育显著地区,支护措施稍有不慎就容易出现突然沉陷或者破裂<sup>[3]</sup>。与此同时,巷道还受到地压的长期影响而发生拱顶下沉及两帮收敛的变形,极大地影响了巷道的通风,交通及人员的通行。这类失稳问题成灾机制多为缓慢演化+突发破坏,呈现隐蔽性与突发性共存特点。

### 4. 地下水渗流作用引发岩体劣化与突涌灾害

深部矿区含水地层分布广,水压一般较大,与岩体结构联系紧密。地下水渗流在带来湿润环境影响的同时,还直接以孔隙水压力的形式参与改变岩体力学行为。长期水流冲刷,岩石颗粒之间的结合力逐渐减弱,容易形成劣化带而导致力学性能明显下降。特别是在碳酸盐岩,软岩或者风化带,这“水分--岩石--力量”三场耦合作用常常会诱发滑动和坍塌的严重后果。另外,地下水渗流路径不确定,使一些矿井无意中遇到突水,突泥等灾害,损害程度很难预测。工程设计和施工中如果忽略了解含水层赋存状态以及含水层和开采结构之间的相互影响,就会造成系统性灾害。更复杂地,渗流产生的孔压波动会诱发巷道支护破坏,甚至会诱发特定条件的岩爆。

## 三、深部矿业开采的岩石力学应对策略

### 1. 优化巷道布置与支护结构设计,控制应力集中与岩爆风险

深部矿业开采时,因围岩受到的地应力值比浅部作业区高得多,往往会诱发应力集中和岩爆这类典型力学灾害,所以,巷道布置和支护系统是否科学,就成了治理此类问题的第一技术途径。根据实际采动的地层构造,应力场分布及岩性条件等因素,运用“减应-控爆-坚固”一体化的设计原理,对巷道的走向和布置进行了调

整,能够有效地避开应力集中区域。如顺层排列巷道,减小交叉点和断面突变等可以减弱地质结构突变造成的局部应力集中。另外,在特殊岩层或者高地应力地区,可以引入锚杆—网片—喷层等柔性支护理念进行复合支护体系以增强支护的变形协调,从而避免因刚性结构二次扰动围岩而引发岩爆。同时为了避免岩爆向工作面扩展,支护设计时应纳入“能量释放”的机理,并合理安排卸压孔,设置诱导裂缝或者采用新的吸能支护构件,这些措施能有效地释放局部的高应力,限制能量积聚。经过深入的研究和实际工程应用,我们发现支护方案的动态调整能力是至关重要的。为了提高巷道的长期稳定性和作业安全性,我们应该根据矿压监测的数据进行持续的优化,并逐渐建立一个“随采-随测-随调”的工作机制<sup>[4]</sup>。在岩爆发生频繁地区,预警传感网络的布设和微震数据的引入辅助决策也逐步成为了现代巷道设计中的一种辅助基础。所以巷道和支护不应孤立看待,应纳入整体开采力学系统动态调控中,建设具有适应性和反馈调节能力工程系统。

### 2. 采用通风降温与隔热材料,提升岩体热稳定性与作业环境

随着采深的继续加大,井下热储能效应明显增强,工作面的环境温度也节节攀高,甚至有的深部矿区已突破45℃的耐热极限。这一高温环境不但影响作业效率和人员健康,而且严重限制了围岩热力学稳定性并加剧了岩体膨胀裂隙及热诱发破坏发生概率。通风系统设计已不满足于简单的空气交换基本要求,而是要精细化分区调控并与当地热源强度、风流组织方式等因素相结合才能准确安排。介绍了采用高效风机和导流装置对风速分布进行优化的分布式主辅机组合通风结构能够显著提高热空气抽排效率;同时利用局部空调,喷雾冷却装置和热交换器控制高温作业区温度,有效减轻作业环境热负荷。除了通风系统主动冷却之外,隔热材料对岩体热稳定性的增强也起到了至关重要的作用。将低导热保温层铺设于巷道壁面或者关键支护构件上,可以有效地隔热热传递到作业空间。对特殊地区,也可以尝试向围岩内灌注高热容量材料以吸收和缓释由岩体深部传递过来的热能,从而从根本上弱化热破坏风险。深井施工时,通过热传导数值模拟及现场热参数监测相结合的方法,实现降温策略及材料布置方式的动态调整,进一步提高了控热效率。值得关注的是高温环境围岩热膨胀问题不可忽视,结构设计时应留有形变冗余以避免热-力耦合作用引起支护失稳。通风和隔热两不误,建立高温矿区

“控热—稳岩—保人”多目标热环境调控系统是现阶段深部矿业朝着高效和安全方向进化的重要途径。

### 3. 强化围岩监测与主动支护技术, 提高顶板稳定性与预警能力

顶板稳定性是影响深部矿井构造安全性的关键因素。与浅部矿山相比较, 深部围岩较易发生塑性变形, 剪切破坏甚至整体垮塌现象, 诱因既有高地应力诱发的结构疲劳问题, 也有地压变化, 地下水侵蚀和温度梯度综合影响。传统的被动支护方法主要依赖于灾后的补救措施, 其时效性和预判性相对较差, 但近些年, 这种方法已逐步向“监控—反馈—积极支护”的模式转变, 以构建更为先进的防护体系。以该监测系统为例, 它已不仅仅停留在人工巡查和静态检查的层面上, 而将一体化的实时监测网络布放起来, 其中包括多个点的锚杆应力计, 围岩位移计, 微震声发射设备和地压传感装置。通过数据融合建模和异常行为预判可实现隐患区域快速定位和风险等级判定并为支护策略制定提供量化依据。以此为基础的主动支护技术也随之发展变化。锚索预应力调控, 注浆锚杆耦合支护和组合能量耗散元件这几种新技术已经得到了广泛的应用, 它们在增强支护前期承载力的同时还使结构具有较好的吸收滞后变形的能力。在面对顶板动态行为时, 可调式柔性支护系统也可以被设计出来, 利用监测数据的反馈来自动调整刚度和应力分布以达到更好的围岩协调控制效果。提高围岩稳定性也需要多学科融合的支撑, 岩体力学分析和数值仿真结果要适时融入现场管理流程中, 促进由“经验管理”到“数据驱动型决策等”的转变<sup>[5]</sup>。深部矿井可在支护设计, 实施和调整的整个过程中, 建立起反应快, 控制细的围岩支护体系会显著减少顶板失稳事故的发生, 提高整个工程的安全等级。

### 4. 构建水害防控系统与注浆加固技术, 减少渗透破坏与突水风险

深部矿井水害问题具有隐蔽性和突发性的特点, 在诸多岩石力学灾害中往往处于高风险级别。随着开采深度不断加大, 岩层含水性越来越强, 水压越来越高, 裂隙发育也越来越复杂, 常规防排水模式已经不能满足高压渗透下突水防治需要。为此, 应从设计层面上建立多层次水害防控系统并辅之以准确有效的注浆加固技术才能从根本上减少水体破坏潜能。首先, 在地质勘探的过程中, 我们需要加强水文地质的探查点密度, 并结合电法、瞬变电磁等技术来绘制地下含水结构的三维地图, 从而明确地下的突水路径和富水层的分布情况。根据其

分布的特性, 我们布置了区域性的截水帷幕、引排通道和排水井系, 从而构建了一个“分段隔离, 定向排导, 现场处置”的封堵引排系统。基于此, 注浆加固技术为直接介入岩层渗透性研究提供了一种途径。通过高压灌注速凝材料(例如聚氨酯, 水泥—水玻璃双液浆)对裂隙、破碎带或空隙进行充填, 可有效增强岩体致密性与强度, 抑制裂缝扩展与渗流通道形成。施工组织中, 引入了“预测—监控—注浆—核查”闭环机制以保证注浆效果目标性和持久性。现代注浆技术也逐渐引进了信息化的手段, 例如注浆压力的自动记录, 扩散半径建模以及远程控制设备等, 使得注浆过程变得越来越精细和可控。水害防控不是一个孤立的项目, 要和通风, 支护系统一体化联动设计才能建设一个完善的矿井灾害应对体系。唯有通过系统化的防水策略与精准高效的加固手段, 方能在深部高压、高渗透环境中稳妥保障采掘作业连续性与安全性。

### 结束语

深部矿业开采是今后矿业发展的一个重要方向, 但是它面临着复杂多变的岩石力学问题, 需综合利用各种技术手段加以处理。通过优化巷道布置和支护结构设计, 使用通风降温和隔热材料, 加强围岩监测和主动支护技术, 并建设水害防控系统和注浆加固技术, 本发明能够有效减少深部矿业开采风险, 确保矿井安全, 提高矿井生产效率。

### 参考文献

- [1] 于子望, 卢帅屹, 白林, 郑天琪.CO<sub>2</sub>地质封存岩石力学问题研究进展[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2025, 55(03): 930-942.
- [2] 潘兵, 周勇, 蔡波, 徐江涛. 杨房沟水电站地下洞室关键岩石力学问题及工程对策研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(03): 53-60.
- [3] 刘宁, 陈平志, 陈浩, 陈建林, 徐剑. 白鹤滩水电站巨型地下厂房主要岩石力学问题与防治对策[J]. 水电与抽水蓄能, 2020, 6(01): 1-8.
- [4] 高富强. 数值模拟在地下煤矿开采岩石力学问题中的应用[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(02): 21-28.
- [5] 石林, 史璨, 田中兰, 张矿生. 中石油页岩气开发中的几个岩石力学问题[J]. 石油科学通报, 2019, 4(03): 223-232.