

深井开采地压基础理论与防控研究进展

王 辉¹,段文权^{1*},刘敬智¹,马俊生¹,郭其林¹,赵海平^{1,2},郝 成^{1,2}

(1. 北方矿业有限责任公司; 2. 中关村科技园区西城园管理委员会, 博士后科研工作站, 北方矿业有限责任公司分站)

摘要: 目前地表及浅层矿产资源不断减少, 未来采矿必然要向深部进军。随着开采深度的增加, 采矿作业面临“三高一扰动”的开采环境, 严重影响采矿作业的正常生产, 开展地压管理工作成为矿山生产的必要前提。从基础理论、监测手段、地压管理3个方面总结目前的相关研究成果, 为矿山实际生产工作提供基础指导。基础理论基于动静力组合加载作用和温度-渗流-应力多场耦合作用2个方面展开, 可以明晰地压活动的内在力学机理; 监测手段基于应力应变监测系统和微震监测系统2部分展开, 静态应力应变监测系统和动态实时微震监测系统相互配合, 实现对生产过程中地压活动的有力监测; 地压管理措施从地压调控方法和支护系统2个方面展开。明晰了目前深井开采地压基础理论和防控手段存在的问题, 进而为后续研究指引方向, 促进深井矿山的大力开采。

关键词: 深井开采; 岩石力学; 动静组合加载; 地压监测; 微震监测; 地压基础理论; 地压调控; 吸能支护系统

中图分类号: TD853 TD32

文献标志码: A

文章编号: 1001-1277(2024)08-0019-09

doi: 10.11792/hj20240802

引 言

目前, 随着地表及浅层矿产资源的减少^[1], 社会发展的需求增加, 未来采矿必然要向深部进军^[2]。国内外已有许多开采深度超1 000 m的矿山^[3], 如南非的Mponeng Gold Mine开采深度达到4 350 m, South Deep Gold Mine开采深度达到3 500 m, West Driefvotlen金矿开采深度达到6 000 m^[4]; 国内的冬瓜山铜矿^[5]、夹皮沟金矿^[6]、会泽铅锌矿^[7]等开采深度均超过了1 100 m, 标志着中国进入深井开采时代^[8]。深井开采处于分布复杂的三维空间应力场中^[9-11], 为了对采场结构稳定性进行量化表征, 必须进行岩石力学相关研究。采矿行为带来的强扰动^[12], 导致岩石原有的应力平衡状态被破坏^[13], 岩石内积聚的弹性能释放^[14], 导致容易产生岩爆、应力突出、巷道坍塌等地压显现现象, 以及硬岩发生高应力诱导的板裂破坏现象^[15-16], 边壁形成V形破坏区^[17], 对施工人员生命安全造成危害^[18-19]。因此, 实际工程中除了考虑原始地应力场的作用外, 岩石的物理力学性质、结构、工程性质、支护类型和支护时间等都会影响采场的稳定性, 地压作为地应力在岩石中的具体表现, 进行地压的分析和控制对于保证工程安全具有重要意义。

地压管理已成为深井采矿的重要热点问题^[20], 但目前得到的理论和经验不能完全指导深井采矿作业, 传统的岩石力学理论已不适用于深井环境^[21], 对开采过程中的应力状态无法准确预测和控制^[22]; 传统的支护材料不能完全适应深井高温高应力条件等; 以及对板裂破坏的发生机理及其诱发岩爆的机制仍缺乏深入理解。因此, 本文拟通过总结目前深井开采岩石力学研究新进展, 明晰深井开采地压管理的内在力学机理; 其次, 针对地压活动空间分散性和时间随机性的特点, 总结目前地压监测系统的方法、技术与装置, 揭示矿山地压活动规律; 最后, 总结深井开采高应力环境下的地压管理措施, 并结合目前的研究进展, 归纳总结深井开采地压控制技术的发展方向, 为后续矿山深井开采地压控制提供参考依据。

1 深井开采岩石力学研究新进展

地压管理是深井开采的重点, 需要进行相关岩石力学研究。因此, 本文拟从岩石动静组合加载力学和深井开采岩石力学多场耦合分析2部分内容进行展开论述。

1.1 岩石动静组合加载力学

近几年来, 随着越来越多矿山开采的深度超过

1 000 m, 深井开采与常规浅层开采岩石静力学、动力学性质存在较大差异^[23]。主要原因在于常规静力学主要研究静压作用下岩石的力学性能^[24-25], 而动力学主要研究动压作用下岩石破坏的相关规律^[26]。结合深井开采工艺, 开采前的静应力是必须考虑的, 同时也需要预防后期开采过程中扰动引起的应力调整变化。因此, 围岩会受到“静应力 + 扰动应力”的组合作用, 简称动静力组合加载作用。

针对动静力组合加载作用的研究已逐渐深入, 充分考虑三维载荷加载形式, 逐步向真三轴转变^[27]。深井开采围岩受力如图 1 所示。

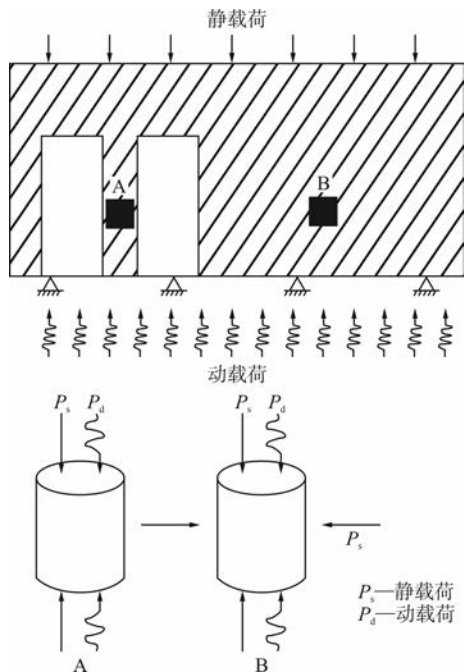


图 1 深井开采围岩受力示意图^[27]

Fig. 1 Schematic diagram of surrounding rock under stress in deep mining

基于动静组合加载力学研究, 明晰了动静力组合加载作用时岩石的破坏形态。李夕兵等^[28]基于动静力组合加载系统, 得到岩石在动静组合加载力学作用下呈现拉伸破坏。余永强等^[29-30]基于三轴动静加载试验, 明晰了岩石的破坏形态主要为拉伸破坏和压剪破坏。赵伏军等^[31]对花岗岩进行了动静耦合加载试验, 发现动静组合载荷下岩石更容易破坏, 因此, 选择合理的动静力组合加载方式, 能提高破岩效果。

通过动静力组合加载作用下“岩爆”模拟试验, 明确在复杂应力环境下岩爆现象的发生机制。在动静力组合加载作用下, 岩石试样内部的应力状态会发生变化。当动载超过岩石的动态抗压强度时, 岩石会发生破坏, 形成裂纹或破裂面。同时, 由于静力学作用的存在, 岩石在破坏过程中可能会出现应力波的传

播、反射和叠加等。需要注意的是, 动静力组合加载作用下“岩爆”模拟试验是一个复杂且精细的过程, 需要充分考虑岩石的物理力学性质、加载条件、监测手段等多个因素。同时, 由于岩爆现象的复杂性和不确定性, 模拟试验结果可能存在一定的局限性和误差, 在实际应用中需要综合考虑多种因素, 结合工程实际情况进行分析和判断。

不同卸荷条件下的岩石破坏呈现出更明显的脆性特征。与常规加载试验中的剪切破坏不同, 卸荷试验往往导致张剪混合破坏, 这种破坏模式的变化直接影响了岩石的力学强度。此外, 卸荷速率越快, 岩石抵抗弹性变形的能力降低越快。因此, 卸荷对岩石力学强度的影响是复杂且多方面的。在实际工程中, 需要充分考虑卸荷效应, 以确保工程的安全性和稳定性。

可以明确, 岩石的破坏主要来源于静载作用^[32], 随着静应力的提高, 岩石破坏时会经历“吸能—释能—吸能”的转化阶段, 吸能状态对应常规动态破坏, 而释能状态则对应岩爆情况。此外, 卸荷对岩石还会产生明显的强度弱化效应, 卸荷速率越快, 强度弱化效应越显著^[33]。

1.2 深井开采岩石力学多场耦合分析

深井开采时岩石环境会变得十分复杂, 除了高应力环境, 还要考虑高温、水流作用对于岩石力学特性的综合影响。岩石处于多场耦合环境中, 仅考虑某一个因素对于岩石力学特性的影响过于片面化, 不能为实际生产提供科学参考。应综合考虑应力—温度—渗流场三者的综合作用, 得到的结论才具有科学意义和工程价值。

深部岩石的力学性质受温度影响强烈。因此, 为了保证深井开采作业的安全性, 必须研究温度对岩石性质的影响^[34]。研究发现, 岩石的抗压强度和弹性模量均受温度影响, 随温度变化呈线性变化趋势。低温环境中, 随温度增高, 自由水含量降低, 岩石抗压强度和弹性模量增强^[35], 而高温环境中与之相反。温度范围的不同导致岩石力学性质也不相同。

通过对高温影响岩石力学特性的机理进行分析可知: 首先是矿物颗粒热膨胀^[36]。由于岩石形成过程中会受到外界因素的强烈影响, 因此其内部结构存在差异, 相应的矿物颗粒热膨胀系数各不相同, 分子运动的强度也存在差异^[37]。其次, 含水率也对岩石力学特性有重要影响。根据水膜理论, 将岩石内的水分分为自由水和结合水, 当温度逐渐升高时, 岩石内部的自由水含量急剧降低, 岩石颗粒之间直接接触, 导致其抗压强度和弹性模量增大, 力学特性变强^[38]。当处于高温环境中, 达到一定温度后, 岩石晶格中的

结合水析出,晶格之间存在裂隙,导致岩石内部结构破裂,最终导致宏观上的抗压强度和弹性模量降低,力学性能变差^[39]。

在工程地质灾害中,水的存在会加速岩体的破裂。随着渗流压力的增大,围岩峰值应力减小,其力学特性受渗流条件的影响而变化,同时岩石在渗流状态下存在明显的应变局部化现象^[40]。有学者基于三轴压缩和渗透试验,研究了石灰岩的力学破坏特性和渗透特性之间的联系,发现岩石试样在应力-渗流耦合作用下会形成大量的微观裂纹,剪切微裂纹的比例随着静压和围压的增大而增大,此时岩石的强度特性也急剧降低^[41]。因此,渗流场状态对岩体力学状态有不同程度的影响。

早期对于多场耦合下岩石力学特性的研究,主要集中于单一场或双场耦合,目前随着设备和技术的不断更新,可采用多种手段实现多场耦合下岩石力学特性的研究^[42]。例如:国外研发的耦合试验机,可以同时施加温度、水压和应力,实现三场耦合,得到岩石的应力-应变曲线^[43];国内河海大学研制了渗流-应力耦合系统装置^[44],可进行多场耦合作用下的测试。随着数值模拟的快速发展,为多场耦合下岩石力学性能的研究带来新思路。

目前,多场耦合下岩石力学性能的研究多集中于岩石在温度-渗流-应力作用下的力学特性^[42]。有学者研究温度、围压和渗流特征对黏土岩力学性能的影响,得到温度和围压对黏土岩的变形影响较大,明晰了温度对黏土岩强度变化的作用机理^[45]。有学者用数值模拟建立温度-渗流-应力耦合模型,研究了温度和渗流压力对岩石内部结构的影响机理^[46]。有学者从质量守恒、动量平衡和能量守恒角度,得到两两耦合强度的量化计算^[47]。也有学者结合实际问题,得到了适用于特定对象的本构模型。但是,到目前为止,温度-渗流-应力三场耦合的本构模型仍没有形成完整的理论体系,特别是在模型建立方面还存在较大的局限性,后续研究有必要对耦合作用下力学模型的建立进行更深入的探讨。

基于上述研究,由于深部岩石处于“三高一扰动”的环境中,为了实现深井地压管理,对其力学的深入研究尤为重要,综合分析温度-渗流-应力三场耦合及动静力组合加载作用下岩石的力学特性变化,是保证开采安全性的前提。

2 深井开采地压监测技术

深井开采过程中地压变化极复杂,且易受采矿活动的影响^[48]。《国家安监总局关于印发非煤矿山领域遏制重特大事故工作方案的通知》(安监总管

[2016]60号)规定,采深超过800 m的矿山必须安装地压监测系统^[8]。因此,地压监测作为保证深井采矿作业安全的有力手段,必须进行系统化研究。

本文通过应力应变监测系统和微震监测系统对深井开采地压监测技术进行阐述。通过建立静态应力应变监测系统,实现对生产过程中围岩应力应变的监测,并配合动态实时微震监测系统及时掌握开采引起的地压活动状况,指导深井矿山的安全生产。

2.1 应力应变监测系统

用于深井开采围岩应力应变监测系统一般由传感器、传输系统和记录系统3部分组成。其工作原理是围岩的地应力作用于传感器,引起传感器的机械、力学、光学或电学的性能改变,通过传输系统,直接传输或放大到读数记录系统。通过间断或连续记录信号,可以明确岩体的应力或变形变化情况^[49]。应力应变监测系统的传感器多用振弦式,因其结构简单,效果稳定,在采矿地压活动监测中得到广泛应用^[50]。

国内外学者基于上述监测装置,通过应力应变监测方法得到围岩的应力和位移状态信息^[51]。基于应力应变监测,提高采场安全的前提下,减少巷道的支护量,降低生产成本^[52]。针对采场结构进行监测,明晰巷道的应力应变变化,降低后期支护及地压控制的成本^[53]。PANZHIN等^[54-55]基于应力应变监测数据、岩体变形参数,确定岩体的变形量和构造应力的大小。KUJRENYA等^[56]通过监测应力应变数据,基于应力回归模型理论,提出巷道开采的安全指标。通过对应力应变的动态变化分析,确定开采过程最大应力处和巷道的最大收敛值^[57]。

上述研究通过应力应变监测装置,得到采场地压变化与采掘活动密切相关。未受采矿活动扰动的区域应力和位移变化平稳,受采矿活动扰动的影响,矿体和巷道围岩中的应力和位移发生变化,地压活动增强,容易出现失稳现象。通过监测手段,分析围岩的应力、位移变化规律,将危险区域提前控制,保障生产安全。

2.2 微震监测系统

微震监测系统基于声发射技术和地震学,来监测采矿生产活动带来的影响^[58]。通过信号检波器^[59],检测岩石释放的能量,确定岩石破坏的状态参数(如图2所示)。微震监测系统可监测岩石地压显现的现象^[60],并以此判断岩体稳定性,以及是否需要采取相应的措施,保证采矿作业的正常进行^[61]。

微震监测作为区域应力场监测手段,根据应力场变化,反推岩体运动状态,从而预警地压显现现象^[62],因此微震监测技术是目前矿山地压监测最为有效的监测手段之一^[63]。近年来,微震监测技术在

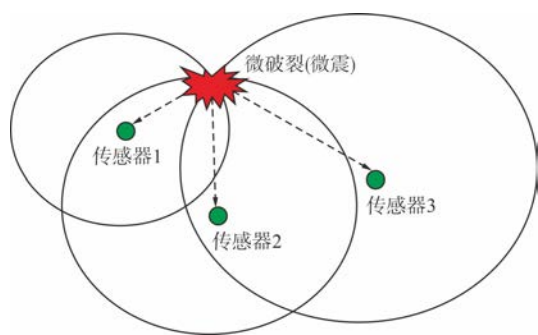


图2 微震定位原理示意图^[8]

Fig.2 Schematic diagram of microseismic positioning principle

金属矿山地压监测中的应用不断增加^[64]。路燕泽等^[65]为研究中美铁矿地压活动规律,通过微震监测系统,综合分析地压活动规律。袁本胜等^[66]基于目前地压监测评价方法,提出了多参数评估方法,并验证此类评价方法的有效性。王登华等^[67]采用三维激光扫描技术并结合数值模拟方法,分析了采空区的稳定性,为后续采空区治理提供技术支撑。

总之,随着技术的不断发展,微震监测技术能实现矿山的安全生产和灾害的有效预防,成为矿山灾害防治中的重要工具^[68]。

上述2种监测系统的区别在于,微震监测系统主要进行实时动态监测,但精度难以满足小范围的监测。而应力应变监测系统可对小范围突出点进行补充监测,具有重要的工程实用价值。二者相互配合,共同监测,成为地压管理的有效监测手段。

3 深井开采地压管理

深井开采时采矿活动处于高地应力环境中,回采后采场的地应力重新分布,出现应力集中,矿体回采后上下盘围岩应力分布如图3所示。深井开采地压管理的核心观念是掌握采场和巷道围岩的应力应变分布规律,采取合理措施,减弱其有效应力值^[69],进而保证采场稳定,实现安全生产^[70]。

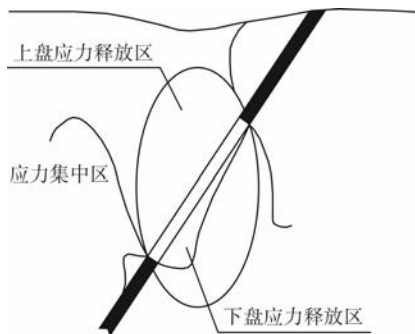


图3 矿体开采后上下盘围岩应力分布示意图^[4]

Fig.3 Schematic diagram of stress distribution in the surrounding rock of upper and lower walls

针对深井开采地压管理工作,本文从深井开采地

压调控方法和支护系统2个方面进行展开论述。其中,深井开采地压调控方法是将应力集中区域内的应力缓解或转移,保证矿山相对稳定。具体措施包括留设隔离矿柱、充填采空区、卸压爆破和回采顺序调整^[71]。

3.1 深井开采地压调控方法

3.1.1 留设隔离矿柱

隔离矿柱是指在回采时开采完一段矿石后留设的一层矿体^[72](如图4所示)。其作用是支撑上下盘围岩,确保采空区稳定,以预防应力集中等对采场的破坏。

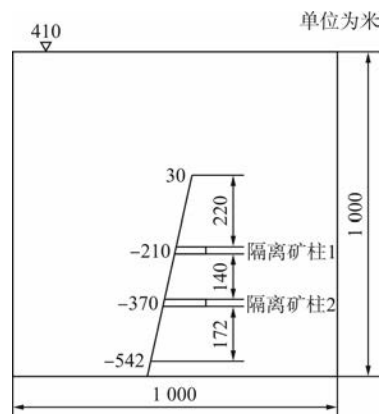


图4 隔离矿柱留设示意图^[73]

Fig.4 Schematic diagram of isolation pillar retention

目前主要通过理论计算与数值模拟方法评估应力变化的影响,合理设计隔离矿柱的位置和厚度^[73]。徐中华等^[74-75]运用Flac^{3D}软件模拟分析回采后矿柱的位移、应力变化、破坏情况等,随着隔离矿柱厚度减小,隔离矿柱内位移、应力和破坏程度均增大,此时采场的稳定性降低,因此可确定矿山安全生产范围内的隔离矿柱尺寸。李玉飞等^[76]通过分析计算隔离矿柱受力特征,推导出隔离矿柱失稳的临界尺寸。李夕兵等^[77]采用Flac^{3D}软件,根据隔离矿柱所受的应力,并在安全的前提下,得到隔离矿柱最优厚度为20m。

留设隔离矿柱对地压调控至关重要。深井采矿活动会破坏采场原应力状态,应力重新分布出现应力集中现象,此时隔离矿柱需要的承载强度远大于未开采之前的强度,隔离矿柱不仅能支撑周边围岩,还能减缓应力传播速度^[69]。对上覆岩石起到支撑作用,有效减小了围岩的位移和形变,从而保证采场的稳定性。另一方面,隔离矿柱能延迟应力集中,使得同一时间、同一空间上作用在围岩上的有效地应力降低,从而保证了采空区的相对稳定。

3.1.2 充填采空区

目前,使用充填料浆充填采空区已成为地压调控的有力手段。该方法中充填体和上下盘围岩组合成

一个稳定有强度的结构整体^[78],大大提高了围岩的承载强度。并且充填体因其组成,能够吸收地压破坏释放的能量,维持采场安全稳定^[79-80]。

深井开采导致应力集中后,充填体充填采空区,充填体的强度特性可以支撑顶板围岩,保持顶板的稳定性^[81]。宋卫东等^[82]发现随着充填体强度的增大,岩体的破坏形式由之前未充填的塑性破坏逐渐转变为剪切破坏,并不会出现大范围的垮塌现象。有学者结合国内外深井开采的现状,经过大量的研究,总结出充填体的三大作用机理为力学作用、结构作用和让压作用^[83-84]。

力学作用体现在充填体使围岩受力变为三轴应力状态,此时强度变大,稳定性增加^[69]。结构作用体现在充填体充填结构面作用,充填材料能进入岩石的裂隙中,固化之后充填材料与岩石形成一个整体,增强了围岩的强度,保证采场的稳定性。让压作用体现在膏体充填体的强度一般不超过 5 MPa,可看作柔性介质,有一定的变形能力,受到一定的应力时能产生应变,能使围岩内部的地压释放,降低围岩承载强度,进而使围岩处于低压状态,保证其稳定。充填体与围岩力学作用如图 5 所示。

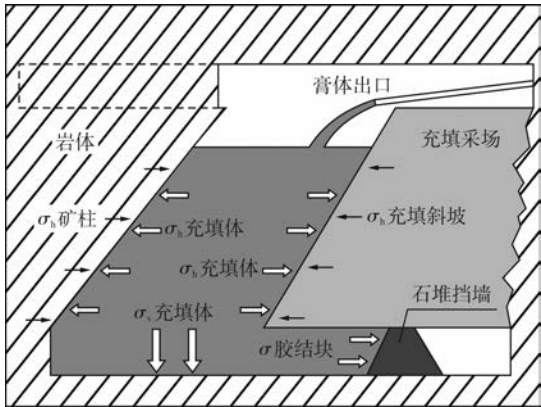


图 5 充填体与围岩力学作用示意图^[69]

Fig. 5 Schematic diagram of mechanical interaction between filling bodies and surrounding rocks

3.1.3 卸压爆破

卸压爆破是指在应力集中区通过注水、钻孔或爆破等方式^[85],预先释放高应力区的部分地压,进而解决存在的安全隐患问题^[86],卸压爆破前理想应力曲线如图 6 所示。目前,卸压爆破技术已广泛应用于深井矿山地压管理,原因在于其具有简单灵活、范围可控等优点。但是,其理论发展严重滞后,工程实践多依赖于工程经验。为此,深入研究巷道爆破卸压机理,完善其理论研究对于保证采场围岩安全具有重要意义。

从应力、变形和能量 3 个角度形成了卸压爆破的理论依据。首先,针对应力分布机理,王明洋等^[87]深

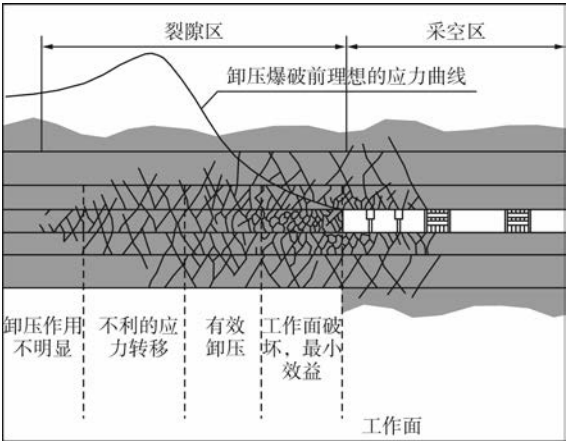


图 6 卸压爆破前理想应力曲线^[69]

Fig. 6 Desired stress curve before pressure relief

入研究发现随深度增加,围岩受到破坏的程度逐渐降低。徐钰东等^[88]采用 Flac^{3D} 软件,研究发现钻孔直径、间距、深度均能深刻影响卸压程度,进而影响深井开采时的应力重新分布,避免应力集中现象,降低采场的有效应力值。

王猛等^[89]研究发现爆破卸压可以增强周边岩体的稳定性。首先,爆破卸压能改善原应力状态,进而提高围岩的抗压能力,保证其稳定性。其次,从变形角度分析,卸压爆破会提供给高应力区域岩体变形更多空间,形成空腔和裂隙,能减少地压活动带来的围岩变形。最后,基于能量理论,卸压爆破在岩体内部可形成一定空区,降低岩体内积聚的弹性能,间接削弱了高应力区域集中的总能量,减弱了对围岩的冲击作用,进而保证了围岩的稳定性。

3.1.4 回采顺序调整

矿山开采时会遵循不同的回采顺序,进而产生不同的应力分布情况。而合理的回采顺序会降低地压显现活动的概率,降低采场的安全风险,因此,合理的回采顺序是控制深部地压活动的有效途径之一。目前对回采顺序的研究方法主要集中在工程类比法和数值模拟分析法^[90]。

针对数值模拟分析法,学者多借用 Flac^{3D} 软件或 Datamine 对采用不同回采顺序回采时的地应力进行分析,得到满足安全生产需求的回采顺序方案。有学者基于 Flac^{3D} 软件针对复杂采空区的稳定性进行分析,在保证安全的前提下,得到了最佳回采方案和回采顺序方案^[91]。彭康等^[92]基于 ANSYS 模拟探讨了回采顺序对周边围岩应力和位移的影响,并据此确定了最佳的回采顺序。黄聪等^[93]在工程地质调查和岩石力学参数试验的基础上,模拟分析不同回采顺序下采场的应力、位移变化,最终确定了最优回采方案。因此,随着计算机技术的快速发展,数值模拟分析法已经成为解决地下深井矿山开采的有效手段。

深井开采岩体结构过于复杂,而数值计算数据量大,运行时间长,为了快速确定回采顺序方案,可根据工程经验来确定,为现场工程进度提供基本参考依据。

3.2 深井开采吸能支护系统

深井开采时采场处于复杂应力状态,容易出现围岩破坏、巷道失稳等现象^[69],因此,为了保证采矿作业的正常运行,除了进行地压调控外,采取有效的支护手段也成为保证安全的关键措施。

目前,常规的支护手段适合于浅层地表的采矿活动,并不适用于深井开采时的地压管理。例如:常规支护容易出现不接顶现象,未能紧贴岩面,很难形成有效支护;直接支护的情况下,受工作面影响,支护产生变形而造成结构失效等^[94],从而降低了支护效率,增加了支护成本。因此,传统的支护手段不能对巷道围岩变形破坏和结构失稳提供有力防控。

针对深井开采地压灾害的特点,以及目前常规支护的不足,提出吸能支护系统。吸能支护系统是保证深井开采稳定性的重要支护方法。目前,针对吸能支护的研究,主要从高韧性新型喷浆材料、吸能锚杆、让压单体支柱等 3 个方面开展^[15]。通过吸能支护,使岩体处于小变形的稳定状态,从而降低动力灾害的发生概率。吸能支护和常规支护对比如图 7 所示。

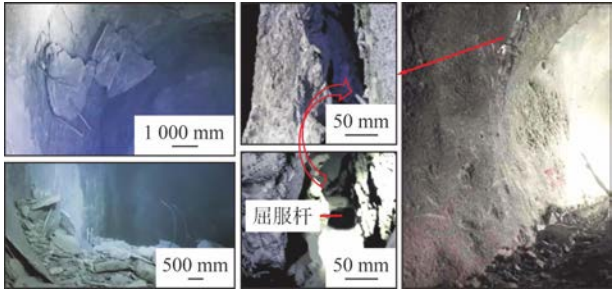


图 7 吸能支护和常规支护对比图^[15]

Fig. 7 Comparison between energy absorption support and conventional support

3.2.1 高韧性新型喷浆材料

普通纤维混凝土因其强度高、刚度大,普遍被应用于工业生产^[95]。但是,因其抗拉能力差、结构易开裂,不适应于应力复杂的深井开采环境,不能保证采场结构的稳定。因此,使用高韧性新型喷浆混凝土对保证采矿作业的安全具有重要意义。

目前,高韧性新型喷浆混凝土已成为工程领域研究的热点,其尾砂粒径从毫米级到微米级^[96]。曾旭等^[97]研究了水胶比和聚乙烯纤维掺量对其抗压和抗折强度、弯曲韧性性能的影响。石运港^[98]探究了灰砂比、纤维掺量、粉煤灰和硅灰掺量对其力学性能的影响。涂开胜等^[99]通过改变纤维掺量,从宏观力学

性能和微观纤维分布,研究了纤维掺量的影响。熊志卿等^[100]研究了纤维长度对混凝土流动性、强度的影响,发现纤维长度越长,混凝土的流动性越差,抗压强度稍有降低。

3.2.2 吸能锚杆

吸能锚杆最早于 1992 年在南非的矿山支护工程中被应用^[101]。吸能锚杆在发生变形的同时具有一定的承载能力,此变形可以使围岩发生形变,进而减缓其内部积蓄的弹性能量。在保证自身承载能力的同时,提供较大的变形量,可以有效防止自身发生断裂失效。此变形也可避免和刚性锚杆一样,受到大变形挤压而断裂失效。此类吸能锚杆适合应用于深井开采时大变形岩体的支护。

吸能锚杆可分为材料变形锚杆和结构变形锚杆^[102],材料变形锚杆包括 Cone bol、D - bol 及 Garford bol 等;结构变形锚杆包括 Roofex bol 及 He - bolt 等。

对吸能锚杆的力学性能测试方法可以分为 3 种:室内试验、理论分析和现场试验^[102-103]。室内试验主要通过拉伸试验来验证吸能锚杆的力学特性,例如:王琦等^[104]利用拉伸试验系统对吸能锚杆进行室内试验。理论分析主要是基于力学理论建立其力学模型,推导吸能锚杆的理论最大变形和承载强度。现场试验主要是对采场围岩位移进行监测,进而评价吸能锚杆的效果。此方法可将岩体及支护系统进行整体分析,但难度大,成本高。

在实际生产中,吸能锚杆一般与金属网或喷射混凝土进行联合支护^[69],此联合支护方法可应对深井开采应力复杂多变的环境,为深井开采及高应力矿体安全回采提供技术保障。

3.2.3 让压单体支柱

矿用让压单体支柱属于恒阻式支柱,具有恒定不变的工作阻力,适应于不同的工作面、顶板条件和矿山压力^[105]。其极限承载力可达 1 000 kN^[15],可适用于倾角 $\leq 35^\circ$ 的任何工作面(如图 8 所示)。其性能好坏直接影响矿井安全。工业试验表明,该装置精度高、操作方便、适应性强,为深井采矿现场使用提供了便捷的技术服务^[106]。

4 目前存在的主要问题

纵观国内外研究现状,虽然在深井地压管理方面取得了丰富的科研进展,但相关研究仍需进一步加强,目前深井开采地压管理研究存在的主要问题如下:

1) 地压演化理论研究尚不成熟。目前的研究并未明晰开采过程中地压的演化规律,未形成系统、成

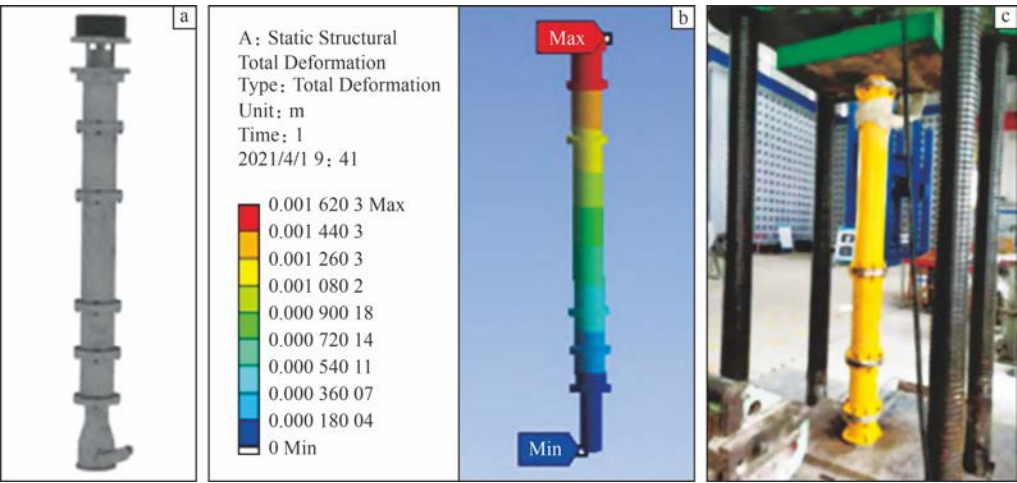


图 8 岩体让压单体支柱示意图^[69]

Fig. 8 Schematic diagram of single support pillar for pressure yield in rock mass

熟的理论体系。虽然针对地压演化规律有尝试性的探索,形成了一些理论框架和模型,但这些理论是基于简化的假设和条件,得到的结论往往只是针对特定开采条件下的定性或半定量说明,难以全面反映实际开采过程中的复杂情况,无法得到普适性的研究成果。地压演化规律的研究涉及岩石力学、采矿工程和地质工程等,目前多学科交叉融合并未充分发展,各学科并未发挥其特有优势,因此开展多学科综合研究存在较大的挑战。

2)深部岩石力学理论有待发展。深部岩石处于复杂的应力状态下,目前的研究缺乏对岩石变形、破坏行为的全面认识,破碎模型不够完善,因此其破裂机制并未完全明晰,需要后期进一步的研究和探索。且深井环境中涉及温度-渗流-应力作用下的多场耦合,其力学行为受到水、热等多种因素的影响,对于这些因素耦合作用的机理研究还不够深入。

3)监测系统需要不断完善。目前地应力监测系统主要有应力应变监测系统和微震监测系统2部分,但其存在如下不足:首先是监测精度和数据稳定性问题,监测数据的准确性和可靠性是实际生产的前提,环境因素的影响,可能导致监测数据失真;其次是信号干扰,在应力应变监测和微震监测中,复杂的地质环境往往会对监测信号造成大量的干扰,会影响对所需信号的准确识别和分析;最后是监测系统维护问题,应力应变监测系统和微震监测系统通常由多个子系统组成,需要进行高效维护。

4)深井开采地压管理制度不够完善。地压管理是一个系统工程,需要多部门、多设备间的协调。但是,目前由于部门间的职责和管理流程,容易导致职责不清、管理混乱等问题。由于不同部门间工作性质的不同,沟通机制存在差异,很容易导致地压管理效率低。最后,地压管理工作的考核标准不够明确,导

致考核结果不够客观、公正,无法有效激励员工积极参与地压管理工作。

5 展 望

随着深井开采地压管理理论研究不断深入,技术手段不断进步,可持续发展观念不断深入,多学科融合和管理制度不断完善,未来中国的深井开采技术必会实现高质量、高水平发展。因此,未来深井开采地压管理工作可在以下几个方面展开:

1)理论研究的系统化。后续应基于多学科交叉融合,明晰地压演化机理,以更好地理解 and 预测地压演化规律。岩石力学的理论研究要综合考虑动静力组合加载作用和温度-渗流-应力多场耦合作用,综合考虑其对岩石力学性能的影响,研发相关设备,丰富相关理论,明晰深井环境下岩石的力学响应行为,保证得到的结论能真正指导深井开采。

2)未来地压监测技术将实现高精度的智能化。首先是智能化,通过实时监测和分析数据,自动识别地压异常,并采取相应的措施进行预警和调控。其次是高精度,采用更加先进的地压监测传感器和设备,实现地压数据的精准采集、传输和处理,有助于及时发现地压异常,采取有效措施,防止灾害发生。同时建立一个集微震监测、应力应变监测、位移监测于一体的多源动态感知系统,以实现地压变化的量化关系。

3)绿色和可持续性发展。随着环保意识的提高,地压管理也逐渐向绿色和可持续性方向发展。这不仅是为了满足社会对环境保护的要求,更是企业实现长期可持续发展的必然选择。因此,后续研究应采用低能耗、低污染的支护方法和充填材料,降低采矿成本,减少对环境的影响。

4)地压管理制度完善。随着地压管理在矿业开

采中的重要性日益凸显,系统性的地压管理体系是前提。首先,可以设立专门的地压管理部门,负责制定和实施地压管理计划。其次,建立完善的地压管理流程。从地压监测、数据分析、预警预报到应对措施各个环节,都将有明确的流程和规范。此外,企业还将建立有效的沟通机制,确保各部门之间的信息交互。最后,政府也需要加强对地压管理的监管和指导,制定相关政策和标准,推动企业加强地压管理。

[参考文献]

- [1] 于世波,杨小聪,原野,等.深部区域采矿时序的地压调控卸荷效应研究[J].黄金科学技术,2020,28(3):345-352.
- [2] 刘立顺,杨小聪,万串串,等.金属矿山深井开采中的力学问题研究进展[J].有色金属(矿山部分),2022,74(4):14-18,25.
- [3] 赵兴东.超深竖井建设基础理论与发展趋势[J].金属矿山,2018(4):1-10.
- [4] 杨承祥.深井金属矿床高效开采及地压监控技术研究[D].长沙:中南大学,2007.
- [5] 郝英杰,王春龙,姜明伟,等.缓倾斜中厚矿体上向进路充填采矿方法优化及地压控制研究[J].有色金属工程,2023,13(5):114-121.
- [6] 刘超,程文文,唐学义,等.夹皮沟金矿田北沟金矿床原生晕特征及深部成矿预测[J].黄金,2020,41(11):16-20.
- [7] 周沛洁.云南会泽铅锌矿深部矿坑涌水量预测[D].昆明:昆明理工大学,2011.
- [8] 王贺,陈何.充填体矿柱刚度对采动地压分布影响分析[J].有色金属工程,2022,12(5):106-111.
- [9] 谢和平.“深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J].工程科学与技术,2017,49(2):1-16.
- [10] 杜良平.终南山隧道大直径深竖井围岩稳定性研究[D].上海:同济大学,2008.
- [11] 李夕兵,姚金蕊,宫凤强.硬岩金属矿山深部开采中的动力学问题[J].中国有色金属学报,2011,21(10):2551-2563.
- [12] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华.金属矿深部开采现状与发展战略[J].工程科学学报,2019,41(4):417-426.
- [13] PETER K, KAISER. Design of rock support system under rockburst condition[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2012(3):215-227.
- [14] 程洪飞.浅析深部开采冲击地压发生条件及预测和防治[J].科技与企业,2011(16):157.
- [15] 罗勇,宫凤强.深部硬岩巷道围岩板裂破坏试验研究进展与展望[J].煤炭科学技术,2022,50(6):45-60.
- [16] 周辉,卢景景,徐荣超,等.深埋硬岩隧洞围岩板裂化破坏研究的关键问题及研究进展[J].岩土力学,2015,36(10):2737-2749.
- [17] 吴世勇,龚秋明,王鸽,等.锦屏 II 级水电站深部大理岩板裂化破坏试验研究及其对 TBM 开挖的影响[J].岩土力学与工程学报,2010,29(6):1089-1095.
- [18] 秦秀山,陈何,刘建坡,等.深部大矿段采动环境监测及地压动态调控技术[J].中国有色金属学报,2022,32(12):3871-3882.
- [19] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究探索[J].岩土力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.
- [20] 杨承祥,罗周全,唐礼忠.基于微震监测技术的深井开采地压活动规律研究[J].岩土力学与工程学报,2007,26(4):818-824.
- [21] 于润沧.论当前地下金属资源开发的科学技术前沿[J].中国工程科学,2022,4(9):8-11.
- [22] LI X B, GONG F Q, TAO M, et al. Failure mechanism and coupled static-dynamic loading theory in deep hard rock mining: A review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017,9(4):767-782.
- [23] 古德生,李夕兵.现代金属矿床开采科学技术[M].北京:冶金工业出版社,2006.
- [24] 李夕兵,宫凤强.基于动静组合加载力学试验的深井开采岩石力学研究进展与展望[J].煤炭学报,2021,46(3):846-866.
- [25] 蔡美峰,何满潮,刘东燕.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.
- [26] 李夕兵.岩石动力学基础与应用[M].北京:科学出版社,2014.
- [27] LI X B, ZHOU Z L, LOK T S, et al. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007,45(5):739-748.
- [28] 李夕兵,周子龙,叶州元,等.岩石动静组合加载力学特性研究[J].岩土力学与工程学报,2008,27(7):1387-1395.
- [29] 余永强,余雳伟,范利丹,等.三维动静组合加载下石灰岩力学特性研究[J].金属矿山,2022(11):84-91.
- [30] 闻磊,梁旭黎,冯文杰,等.冲击损伤砂岩动静组合加载力学特性研究[J].岩土力学,2020,41(11):3540-3552.
- [31] 赵伙军,李夕兵,冯涛,等.动静载荷耦合作用下岩石破碎理论分析及试验研究[J].岩土力学与工程学报,2005,24(8):1315-1320.
- [32] 宫凤强,李夕兵,刘希灵,等.一维动静组合加载下砂岩动力学特性的试验研究[J].岩土力学与工程学报,2010,29(10):2076-2085.
- [33] 宫凤强,陆道辉,李夕兵,等.动力扰动下预静载硬岩断裂的增韧和减韧效应[J].岩土力学与工程学报,2014,33(9):1905-1915.
- [34] 曹峰.温度对深部岩石力学性质的影响[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2012,14(5):83-85.
- [35] 左建平,周宏伟,刘瑜杰.不同温度下砂岩三点弯曲破坏的特征参数研究[J].岩土力学与工程学报,2010,29(4):705-712.
- [36] 赵洪宝,谌伦建.石灰岩热膨胀特性试验研究[J].岩土力学学报,2011,32(6):1725-1730.
- [37] 吉龙华,李文文,樊亚男,等. C60 机制砂高性能混凝土热膨胀特性试验研究[J].混凝土,2023(6):168-172.
- [38] 王兵强.低温条件下含水率对岩石力学特性的影响分析[J].有色金属(矿山部分),2023,75(2):149-155.
- [39] 周青春.温度、孔隙水和应力作用下砂岩的力学特性研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2006.
- [40] CHEN Y, XU J, PENG S J, et al. Space-time evolution law of progressive failure area and mechanical behaviour of rock under different seepage conditions [J]. Engineering Geology, 2023, 312: 106926.
- [41] ZHAO CH X, LIU J F, LYU CH, et al. Investigation on the mechanical behavior, permeability and failure modes of limestone rock under stress-seepage coupling [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 140: 106544.
- [42] 龙丽洁.温度-渗流-应力耦合作用下砂岩的力学特性和渗流特性研究[D].重庆:重庆大学,2021.
- [43] 王小江,荣冠,周创兵.粗砂岩变形破坏过程中渗透性试验研究[J].岩土力学与工程学报,2012,31(增刊1):2940-2947.
- [44] 盛金昌,杜尚宸,周庆,等.岩石 THMC 多因素耦合试验系统研制与应用[J].长江科学院院报,2019,36(3):145-150.
- [45] 曾晋.温度-渗流-应力耦合作用下岩石损伤及声发射特征研究[J].水文地质工程地质,2018,45(1):69-74.
- [46] STEFANO H H. Numerical analysis of strain localization in rocks with thermo-hydro-mechanical couplings using cosserat continuum[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018,51:3295-3311.
- [47] 贺玉龙.三场耦合作用相关试验及耦合强度量化研究[D].成都:西南交通大学,2003.
- [48] 王之虎,邓高峰.深井矿山地压活动调查与分析研究[J].采矿技术,2020,20(4):71-73.
- [49] 谈成轩,张鹏,王继明,等.原位地应力测量与实时监测在强构造活动区深埋地下工程中应用的思考[J].地质力学学报,2023,29(6):757-769.
- [50] 夏才初,李永盛.地下工程测试理论与监测技术[M].上海:同济大学出版社,1999.
- [51] 谢和平,陈忠辉.岩石力学[M].北京:科学出版社,2004.
- [52] 路燕泽,王社光,王立杰,等.基于微震监测的金属矿山地压规律分析及监测研究[J].有色金属工程,2023,13(11):101-107.
- [53] 要云生,丁亦敏,杨小聪.矿块崩落法混凝土底部结构应力应变监测研究[J].矿冶工程,1994,14(4):8-11.
- [54] PANZHIN A, PANZHINA N. Monitoring of the stress-strain state of open pits adjacent rock mass[J]. E3S Web of Conferences, 2020, 192(8):04017.
- [55] 杨八九,侯克鹏,孔学伟,等.基于数值模拟分析的采场应力阻隔及地压控制研究[J].有色金属工程,2021,11(4):118-124.
- [56] KUJRLIENYA V M, BARYSHNIKOR D V, BARYSHNIKOV V D, et al. Development and improvement of borehole methods for estimating and monitoring stress-strain behavior of engineering facilities in mines[J]. Journal of Mining Science, 2019,55(4):682-694.
- [57] GAO S, CHEN J, ZUO C, et al. Monitoring of three-dimensional additional stress and strain in shield segments of former tunnels in the construction of closely-spaced twin tunnels[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017,35(1):69-81.
- [58] 程洪飞.浅析深部开采冲击地压发生条件及预测和防治[J].科技与企业,2011(15):131.
- [59] 张兴东,唐春安,李元辉,等.基于微震监测及应力场分析的冲击地压预测方法[J].岩土力学与工程学报,2005,24(增刊1):4745-4749.
- [60] 唐绍辉,潘懿,黄英华,等.深井矿山地压灾害微震监测技术应用研究[J].岩土力学与工程学报,2009,28(增刊2):3597-

- 3 603.
- [61] MAOCHEN G E. Efficient mine microseismic monitoring[J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 64(8): 44–56.
- [62] 任凤玉, 明旭, 李海英, 等. 海南铁矿倾斜中厚矿体开采方案优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(11): 1–4.
- [63] 李高清, 袁斌华. 矿山安全监控系统应用中存在的问题与对策[J]. 世界有色金属, 2019(6): 133–134.
- [64] 石峰, 王平, 蔡永顺, 等. 矿山深部开采岩体稳定性监测技术研究[J]. 有色金属工程, 2020, 10(8): 113–118.
- [65] 路燕泽, 王社光, 王立杰, 等. 基于微震监测的金属矿山地压规律分析及监测研究[J]. 有色金属工程, 2023, 13(11): 101–107.
- [66] 袁本胜, 王平, 马玉涛, 等. 基于地压监测的采空区稳定性评估方法研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2024, 76(1): 95–101.
- [67] 王登华, 彭府华, 张智博, 等. 基于微震监测多方法的采空区群稳定性分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2023, 75(6): 37–45.
- [68] XUE Y. Application of microseismic monitoring technology in mine disaster prevention and control[J]. Academic Journal of Engineering and Technology Science, 2023, 6(11): 25–29.
- [69] 赵兴东, 周鑫, 赵一凡, 等. 深部金属矿采动灾害防控研究现状与进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2 522–2 538.
- [70] 钟志强. 阿舍勒铜矿微震监测地压灾害预测研究[J]. 新疆有色金属, 2019, 42(3): 15–17.
- [71] 李炎峰. 赤峰柴胡栏子金矿深部开采地压调控方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
- [72] 赵兴东. 谦比希矿深部开采隔离矿柱稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 2 616–2 622.
- [73] 赵兴东, 朱乾坤, 赵一凡. 板庙子金矿深部开采留设隔离矿柱控制地压数值优化[J]. 采矿技术, 2019, 19(1): 61–66.
- [74] 徐中华, 李金星, 付信凯, 等. 隔离矿柱参数优化与监测分析[J]. 中国矿业, 2023, 32(增刊2): 87–91.
- [75] 董秋平, 徐浩, 周科平, 等. 攀枝花铁矿尖山采保安矿柱回采结构参数优化[J]. 采矿技术, 2022, 22(5): 9–14.
- [76] 李玉飞, 叶义成, 刘晓云, 等. 基于突变理论的崩落法充填法隔离矿柱安全厚度计算[J]. 有色金属工程, 2019, 9(7): 84–91.
- [77] 李夕兵, 彭定涛, 冯帆, 等. 基于中厚板理论的深部崩落法充填隔离矿柱稳定性分析[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(3): 484–494.
- [78] 王明旭. 胶结充填体与围岩相互作用机理及变形演化规律研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018.
- [79] SUN W, WU A X, HOU K P, et al. Real-time observation of meso-fracture process in backfill body during mine subsidence using X-ray CT under uniaxial compressive conditions[J]. Construction and Building Materials, 2016, 113: 153–162.
- [80] ALDHAFERI Z, FALL M. Time and damage induced changes in the chemical reactivity of cemented paste backfill[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2016, 4(4): 4 038–4 049.
- [81] 刘佳维. 充填开采围岩—充填体组合体系应力—位移演化及稳定性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [82] 宋卫东, 任海峰, 曹帅. 侧限压缩条件下充填体与岩柱相互作用机理[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(1): 49–55, 95.
- [83] 彭怀生, 古德生, 邓健. 充填采矿法的技术评价及对冬瓜山矿充填开采的设想[J]. 矿业研究与开发, 1997, 17(4): 8–12.
- [84] 丁德强. 矿山地下采空区膏体充填理论与技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [85] DROVER C, VILLAESCUSA E, ONEDERRA I. Face destressing blast design for hard rock tunnelling at great depth[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 80: 257–268.
- [86] 李成杰. 深部巷道爆破卸压机理与围岩稳定性研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
- [87] 王明洋, 陈昊祥, 李杰, 等. 深部巷道分区破裂化计算理论与实测对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10): 2 209–2 218.
- [88] 徐钰东, 刘广建, 邵彩军, 等. 煤层钻孔卸压效果量化评估及应力分布研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(5): 98–105.
- [89] 王猛, 邹永德, 肖同强, 等. 深部巷道围岩钻孔卸压与锚注支护协同控制技术研究[Z]. 焦作: 河南理工大学, 2017.
- [90] 李元辉, 刘炜, 解世俊. 矿体阶段开采顺序的选择及数值模拟[J]. 东北大学学报, 2006, 27(1): 88–91.
- [91] 覃庆韩, 郭泽洋, 韦峰. 基于Flac^{3D}模拟的破碎矿柱群安全回采顺序优化研究[J]. 现代矿业, 2023, 39(7): 68–71.
- [92] 彭康, 李夕兵, 彭述权, 等. 三山岛金矿中段盘区合理回采顺序动态模拟选择[J]. 矿冶工程, 2010, 30(3): 8–11.
- [93] 黄隰, 魏超城, 丘永富. 基于修正 Mathews 稳定图法与 Flac^{3D}的阿舍勒铜矿深部回采方案优化研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(11): 168–177.
- [94] 杨笑坤. 深部冲击地压巷道钻孔卸压及让压锚固支护技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [95] 江世永, 冯渭. 复合纤维筋混凝土结构设计与施工[M]. 上海: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [96] 邓友生, 陈国军, 李培鹏, 等. 高韧性纤维混凝土特性及工程应用[J]. 混凝土, 2023, 4(5): 158–162, 174.
- [97] 曾旭, 蒋伟勤, 冯庆革, 等. 超高韧性水泥基复合材料力学性能及早期收缩研究[J]. 混凝土, 2023, 4(3): 1–12.
- [98] 石运港. 喷射用高韧性水泥基复合材料的配制及工程应用[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
- [99] 涂开胜, 杨兴霞. 山砂高韧性水泥基复合材料试验研究[J]. 建筑科技, 2023, 7(5): 92–96.
- [100] 熊志卿, 欧忠文, 王经纬, 等. 多尺度混杂 PVA 纤维对喷射超高韧性水泥基复合材料流动性及力学性能的影响[J]. 混凝土, 2018(11): 71–73, 77.
- [101] ORTLEPP W D. Grouted rock-studs as rockburst support: A simple design approach and an effective test procedure[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1994, 94(2): 47–63.
- [102] 孙景超, 宋战平, 刘伟, 等. 适用于软岩大变形隧道的新型吸能锚杆及其参数优化研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(11): 126–136.
- [103] 宋战平, 许晓静, 刘伟, 等. 吸能锚杆及其静动力试验方法研究综述[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(3): 1–13.
- [104] 王琦, 何满潮, 许硕, 等. 恒阻吸能锚杆力学特性与工程应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1 490–1 500.
- [105] 杨建新, 姚玉维. 新型矿用单体液压支柱出厂检验装置的研究[J]. 煤矿机械, 2015, 36(6): 113–116.
- [106] 姚玉维. 新型单体液压支柱出厂检验装置设计[J]. 煤矿机电, 2015(6): 54–57.

Advances in fundamental theories and prevention for deep mine pressure

Wang Hui¹, Duan Wenquan¹, Liu Jingzhi¹, Ma Junsheng¹, Guo Qilin¹, Zhao Haiping^{1,2}, Hao Cheng^{1,2}
(1. Norin Mining Co., Ltd.; 2. Norin Mining Limited Branch Station of Postdoctoral Research Workstation, Management Committee of Zhongguancun Science Park's Xicheng Park)

Abstract: With the ongoing depletion of surface and shallow mineral resources, future mining efforts must inevitably venture deeper. As mining depth increases, operations face a "three high and one disturbance" environment, severely affecting normal production activities. Therefore, pressure management has become an essential prerequisite for mine production. The study consolidates current research achievements in 3 areas, including basic theory, monitoring methods, and ground pressure management, to provide foundational guidance for practical mining operations. Basic theory explores the internal mechanical mechanisms of ground pressure activities through dynamic-static load combinations and temperature–seepage–stress multi-field coupling effects. Monitoring methods discuss the deployment of stress-strain monitoring systems and microseismic monitoring systems, where static stress-strain monitoring and dynamic real-time microseismic monitoring work in tandem to effectively monitor pressure activities during production. Pressure management measures cover pressure regulation methods and support systems, clarifying current issues in fundamental theories and prevention measures for deep mine pressure and guiding future research to promote intensive deep mining.

Keywords: deep mining; rock mechanics; combined dynamic and static loading; ground pressure monitoring; microseismic monitoring; fundamental theory of ground pressure; ground pressure regulation; energy-absorbing support system