

# 黄金矿山深井开采研究进展与发展趋势

赵兴东

(东北大学深部金属矿采动地压灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室)

**摘要:**详细阐述了黄金矿山深井开采国内外研究现状及所面临的技术难题,围绕采动岩石力学理论、岩体结构识别与岩体质量分级、矿山三维工程灾害建模、深部采矿设计方法研究、深部采场爆破落矿技术、采动地压调控、采动地压监测、自承载主动释压支护技术、深部采动对地表岩移影响、通风降温技术、智能开采技术、超深竖井建设等展开了详细的讨论与分析;对于黄金矿山非爆采矿机器人研制、采动岩石力学、深部采动地压灾害防控、深井降温技术、超深竖井建设、基于采动地压均衡的深部连续智能化开采技术等方面的未来发展趋势提出了展望,为黄金矿山深井开采的系统研究提供参考依据。

**关键词:**黄金矿山;深井开采;采动岩石力学;采矿方法;通风降温;智能开采;地压调控;超深竖井

中图分类号:TD85

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)08-0001-18

doi:10.11792/hj20240801

## 引言

深部采矿已经成为世界矿产资源开发的必然趋势<sup>[1]</sup>。当前国外开采深度超过1 000 m的金属矿山有130余座。其中,开采深度超过3 000 m的有16座;最具代表性的国家是南非、加拿大<sup>[2]</sup>,南非的TauTona、Mponeng、SaVuka 3座金矿山开采深度超过4 000 m,南非South Deep金矿建成2 990 m深竖井<sup>[3]</sup>;加拿大的Kidd Creek多金属矿、LaRonde金矿等开采深度超过3 000 m,Creighton多金属矿<sup>[4-5]</sup>开采深度超过2 700 m;美国的Lucky Friday锌矿开采深度达到3 000 m。欧洲开采最深的金属矿是俄罗斯Skalistaja(BC10)铜矿,开采深度2 100 m;澳洲开采最深的矿山为昆士兰Mount Isa铜矿,开采深度1 800 m;亚洲开采最深的矿山是印度Kolar金矿,开采深度超过3 000 m<sup>[6-7]</sup>,由于严重的岩爆灾害,造成矿山被迫关闭。

目前,中国超千米开采的黄金矿山约有20座,主要集中在胶东半岛、夹皮沟金成矿带、灵宝—秦岭金成矿带等。胶东半岛金矿开采深度超过1 000 m的主要有三山岛金矿(1 400 m),采矿证深度达2 700 m,在建1 915 m超深竖井,目前该竖井建设深度已达1 568 m;纱岭金矿建成1 551.8 m超深竖井,新城金矿竖井建设深度达1 527 m,瑞海金矿建设深度超1 500 m,金洲矿业建成1 260 m深竖井,焦家金矿在建1 100 m超

深竖井,玲珑金矿东风矿田、崮鑫金矿等矿山开采深度超过1 000 m。吉林夹皮沟金矿开采深度达1 600 m,其成矿带上的板庙子金矿、大线沟金矿、粗榆金矿开采深度均超过1 000 m。陕西潼关秦岭金矿开采深度1 400 m,潼关金矿开采深度1 200 m。河南灵宝宝峪金矿开采深度1 300 m。山西繁峙东峪金矿开采深度达1 300 m。此外,辽宁二道沟金矿、湖北大冶铜冠嘴铜金矿、湖南湘西金矿等开采深度均超过1 000 m,青海大柴旦矿业拟建1 300 m超深竖井。初步统计,中国深部黄金资源储量约15 000 t,未来10~20年,中国将有更多黄金矿山进入2 000 m深度开采<sup>[8]</sup>。由此可见,黄金矿山深部开采已经成为中国黄金采矿业的重要组成部分。

黄金矿山深部采矿在高井深(>1 500 m)、高地压(>50 MPa)、高地温(>35 °C)、高承水压力(>10 MPa)、强腐蚀、强开挖扰动条件下开采,地质条件更加复杂、区域构造应力大、破碎岩体增多、承压涌水量加大、高温高湿,导致深部矿山生产和作业环境严重劣化。特别是在深部强采动应力“驱动”下,在浅部十分普通的“硬岩”,在深部表现出“软岩”特性<sup>[9]</sup>,致使深部采场/巷道产生了剥落、层裂、屈曲、岩爆、脆—延性大变形等应力控制型破坏。与浅部开采相比,深部采动岩体损伤机制、演化机理、致灾过程、响应特征等均发生了显著变化<sup>[10-14]</sup>,仍沿用浅部“经验法”“工程类比法”指导深部采矿,将导致深部

收稿日期:2024-05-18;修回日期:2024-06-20

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52130403);教育部基本科研业务费重大需求项目(N2301027)

作者简介:赵兴东(1975—),男,教授,博士,研究方向为深部金属矿床开采;E-mail:zhaoxingdong@mail.neu.edu.cn

地压活动频繁、灾害频发、采矿损失贫化加大、资源浪费严重<sup>[15]</sup>。究其原因,当前中国对于深部黄金资源开采缺乏正确的基础理论指导,导致深部采掘活动普遍存在盲目性、低效性和不确定性;现有的采矿设计理论、地压控制方法,均未充分考虑采动应力影响,导致深部黄金矿山开采存在工程难掘、矿体难采、灾害难防、地压难控、生产不连续、效率低、安全性差<sup>[16-19]</sup>等问题;单纯盲目加大采场结构参数、增加采场数量,采用以“矿石流”为基础连续智能化开采等,难以满足深部黄金资源安全、高效、智能化开采理论与技术需求<sup>[20]</sup>。

因此,深部黄金资源开发需充分考虑深部采动地压影响,系统深入研究深部采动岩体损伤机制及其响应,建立深部采场结构设计理论和地压防控方法,形成以采动地压均衡为基础连续智能化安全开采理论和关键技术,也是中国深部金属矿产资源开发亟待解决的关键性科学问题<sup>[21]</sup>。

## 1 国内外研究现状及发展动态分析

与浅部采矿相比,深部金属矿开采是在复杂地质构造、岩性劣化、高应力(高原岩应力、强采动应力)和特殊环境(高温、高湿、大水)下的开采<sup>[22]</sup>。因此,为解决深部金属矿安全、高效、连续智能化开采问题,需从深部矿体赋存地质条件出发,分析矿体所处应力环境,系统研究深部采动岩体损伤本构及其响应,并以此为基础研究采场结构设计、地压灾害防控等基础理论;创新采矿设计方法,开发以采动地压均衡为基础连续智能化开采关键共性技术,为中国黄金矿山深部连续智能化安全、高效开发提供基础理论与关键技术。

### 1.1 采动岩石力学理论

岩体作为天然的地质体,是岩块和结构面的组合体,具有非连续、非均匀及各向异性等特征<sup>[23-26]</sup>。多年来,国内外学者根据大量的室内岩石力学试验,建立弹性本构、脆性本构、完美塑性本构、应变软化本构及延性本构等基本本构模型,每种本构模型均揭示了某类岩石的某一基本应力变形特征<sup>[27-29]</sup>;通过室内试验、现场原位试验、分析测试等,提出了弹-脆-塑性本构、弹性-应变软化本构、弹性-完美塑性本构、弹性-脆性-塑性-延性本构等多种反映岩体应力变形本构关系,且每种本构模型依据岩体类型、岩体质量、应力环境等因素具有不同的适用范围<sup>[30-32]</sup>。在深部高应力条件下,不同质量等级岩体具有不同峰后变形特征及其响应,常见的基本本构模型包括完美塑性本构、应变软化本构及弹脆塑性本构模型等,而完美塑性本构因其峰后参数变化简单而被广泛应用于理论研

究与工程实践,然而其适用范围是非常有限的<sup>[33]</sup>。

Hoek - Brown 结合岩体工程实践,提出了以 GSI 标定岩体质量分级为基础的本构模型,建议:当  $GSI > 75$  时,采用弹脆塑性本构模型;当  $25 < GSI < 75$  时,采用应变软化本构模型;当  $GSI < 25$  时,采用完美塑性本构模型<sup>[34]</sup>。在应变软化本构模型中,岩体峰后强度参数常随软化系数线性衰减,采用 Hoek - Brown 屈服强度准则时,衰减强度参数包括 Hoek - Brown 常数,即  $m, s$  与  $a$ ,以及剪胀角;采用 Mohr - Column 屈服准则时,衰减强度参数包括内聚力、内摩擦角及剪胀角,一般选取塑性剪应变、最大塑性主应变、最小塑性主应变为模型软化系数<sup>[35]</sup>。仅 Carranza - Torres 在采用更为简单的 TRESCA 屈服准则条件下,应用应变软化本构模型,获得了平面圆形及三维球形开挖体围岩应力变形状态闭合解<sup>[36]</sup>。但是,本构模型本身的复杂性,使其在理论计算中很难获取开挖岩体应力变形状态闭合解<sup>[37]</sup>,当前该模型主要在平面圆形开挖体应力、变形与破坏的半理论解析计算与数值模拟中应用<sup>[38-42]</sup>,对于非圆断面地下采动岩体结构,其理论解析根本无法实现,仅可通过数值模拟对深部各种断面形状岩体结构的应变软化表现进行分析计算。Hoek、Brown 等推荐的选取本构模型的量化标准,绝非适用于任意条件下岩体本构模型的选择,很多学者仍对其存在质疑并提出了修正结果<sup>[43-45]</sup>。在实践理论研究与应用中,对于本构模型的选择仍需慎重,特别是在深部差异化采动条件下,深部采动岩体应力变形表现复杂多变,而任意单一本构模型仅能针对某一类采动岩体应力变形表现进行阐释,存在很大局限性<sup>[46-48]</sup>。

为全面、充分揭示深部采动岩体复杂多变的应力变形特征,发展采动岩石力学理论,提出深部采动岩体“广义”应力变形本构模型理念,针对深部采动岩体复杂多变的应力变形特征,以岩体基本应力变形特征及其相对应的应力变形本构模型为基础,构建采动岩体基本本构模型数据库,考虑深部采动岩体工程地质条件、区域构造应力场及岩体力学特性等,借助三维激光测量、微震监测、钻孔电视、钻孔应力计、多点位移计等应力与位移监测、钻孔探视手段,对矿山深部不同开采方法、不同回采顺序下采动岩体结构失稳全过程进行全时空域应力、变形及其微震活动性监测,获取矿山深部采动岩体应力变形特征,以对建立的深部采动岩体损伤本构模型(组)进行校验,实现对深部采动岩体响应特征预测分析,揭示深部采动岩体损伤本质。

### 1.2 岩体结构识别与岩体质量分级

岩体结构是岩石工程设计、稳定性分析与灾害防

控的关键因素。多年来,地质工程师和岩石力学工程师主要采用测线法<sup>[49]</sup>人工测量岩体结构,该方法主要采用地质罗盘和测尺,沿岩石工程某一方向素描出岩体结构二维平面分布及其相互位置关系。为使岩体结构识别具有一定的空间范围,KULATILAKE等<sup>[50]</sup>建立了统计窗法描述局部岩体结构特征。为更好地满足现场岩石工程岩体结构识别,ZHANG等<sup>[51]</sup>和 MAULDON<sup>[52]</sup>分别建立了矩形统计窗法和圆形统计窗法,相对提高了统计窗法适用范围和适用条件。但是,无论测线法还是统计窗法,均为人工采集和描述岩体结构信息,不能全空间尺度反映岩体结构分布特征,且存在低效、费力、耗时、安全性差等问题,难以满足现代岩体工程快速施工的要求。

摄影测量技术<sup>[53-58]</sup>是一种非接触测量手段,主要应用计算机三维成像技术、影像匹配、模式识别等理论与方法,采用双目相机摄取岩石工程表面影像图片,开发岩石结构识别算法,统计和分析岩石工程的三维岩体结构信息,对于地表和露天岩石工程受双目相机焦距影响,图像分辨率差异较大;对于地下工程,摄影测量技术受空间范围、照明条件限制,摄取的岩体结构图像成像质量差、图像拼接困难,且不能在巷(隧)道等进行全三维空间尺度岩体结构测量。为获取全空间尺度岩体结构信息,三维激光扫描技术被应用于岩体结构测量。三维激光扫描技术<sup>[59-60]</sup>不但能够测量识别岩体结构,而且能够构建工程岩体全空间尺度三维模型。

以三维激光点云数据为基础,获取岩体露头点云数据,选用点的法向量作为结构面判断的依据,并设定相应的阈值,对区域生长算法进行了改进。改进后的算法通过比较相邻点的法向量来确定哪些点属于同一结构面。如果点的法向量之间差异小于设定的阈值,这些点将被认为属于同一结构面,并被分为一个簇。利用改进的区域生长法与解析几何理论,实现了岩体结构面智能识别与信息提取,利用岩体结构面的平面性质和法向量的一致性,准确地得出岩体结构面产状信息(走向、倾向、倾角、迹长等)(见图1)。

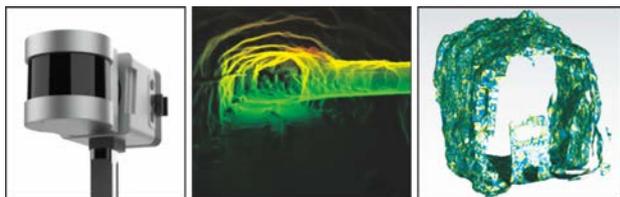


图1 基于三维激光点云的岩体结构识别方法

Fig.1 Method for rock mass structure identification based on 3D laser point cloud

破坏岩体所在位置的采动应力分析,构建了以岩体结构间距、组数分布和采动应力分析为基础的岩体质量分类图表(JSI,见图2)。该分类图表依据岩体结构分布和采动应力阈值,直接确定采场/巷道可能发生的破坏类型,为地压灾害防控提供依据。



图2 以岩体结构分布与采动应力阈值为基础的岩体质量分类图表(JSI)

Fig.2 Rock mass quality classification table based on rock structure distribution and mining-induced stress threshold(JSI)

### 1.3 矿山三维工程灾害建模

矿床地质及矿体地质特征变化的复杂程度是划分矿床勘探类型的根据。地质勘探资料是正确评价矿床勘探质量、提交勘探成果和矿山合理开发的必备基础资料;而地质勘探钻孔钻取的地质岩芯含丰富的岩性、地质结构、岩石力学及地下水等信息。当前,三维地质构造模型<sup>[61]</sup>包括概念模型(Conceptual Models)、物理模拟模型(Physical Analog Models)、数学模型(Mathematical Models)、统计学模型(Statistical Models)及可视化模型(Visualization Models)<sup>[62]</sup>等,构成了一个完整的地质模型模拟系统。

三维地质可视化建模的数据来源主要包括:①直接观测得到的数据,野外填图、测量、遥感、GPS等;②钻孔获取岩芯资料和测井资料;③地震资料<sup>[63]</sup>。其中,地质钻孔获取的数据大多呈规律性离散,仅通过钻孔数据用TIN表面法来构建三维地层模型,不能有效反映地质形态的原貌,需要对原始地质钻孔数据进行预处理、加密。三维可视化地质建模技术包括数学建模及可视化2个方面;构建三维模型的方法主要有断面构模法、表面构模法、块体构模法、线框构模法、实体构模法和体视化技术等。利用三维可视化结果可以实现三维空间中最完整的地质构造解释,描述复杂的地质构造情况,反映矿床的构造形态和属性特征的三维图形图像,实现全三维资料解释、三维地质建模、地质过程的仿真模拟等高级可视化应用功能<sup>[61]</sup>。

通过大量岩体结构面调查、岩体破坏形式调查及

当前矿山三维可视化模型直观反映了矿床地质、岩性、矿体空间形态、断层构造、矿石品位等地质勘探信息。目前三维空间建模中的地质构造解释方法和表达方式仍以剖面和平面的(构造等值线)图图为主,以相对简单的内插、外推方法,包含矿区地层、岩性、岩相、控矿断裂、褶皱构造,围岩蚀变及矿化度的控制等,仅反映埋深、矿体及产状、围岩、构造和采掘工程空间关系的三维可视化模型<sup>[62-64]</sup>。但此类三维地质建模是三维问题二维化,构建的三维地质模型不能直观表达岩体力学、岩体质量等级、地质灾害风险等与数值模型、采掘工程设计的空间映射关系,特别是不能直观展现采掘工程设计与复杂地质结构、地质灾害风险间的三维空间映射关系。究其原因是该建模方法未对矿床富含的岩体质量、岩体力学、地质灾害风险等内部属性信息充分解析,且未与三维可视化模型形成映射关系,无法在“开采前”指导采掘设计,且无法将岩体力学直接赋入矿山三维数值模型参与采动地压分析。

地质岩芯含丰富的地质数据、岩体质量与岩体力学等信息,以纱岭金矿地质岩芯为基础,开发了基于地质岩芯深度学习的RQD识别技术<sup>[65]</sup>和岩性智能识别方法<sup>[66]</sup>。通过岩石力学试验、岩体质量分级、岩体力学参数估算等,研究地质勘探钻孔岩芯随钻孔深度变化的地质灾害工程属性,以勘探线地质岩芯钻孔RQD为基础,基于改进的克里金插值算法对呈规律性“离散”勘探钻孔进行同源异构、归一化处理,通过三维可视化建模平台,实现深部矿(岩)体地质灾害建模与数据存储,构建了含地质灾害风险等级的矿山三维可视化工程灾害模型(见图3),揭示深部未采动矿岩体地质灾害风险。构建含矿床地质、岩体力学、地质灾害风险等级的矿山三维工程灾害结构模型,既能指导深部采掘设计,又能为深部采动岩体稳定性分析提供工程物理模型。

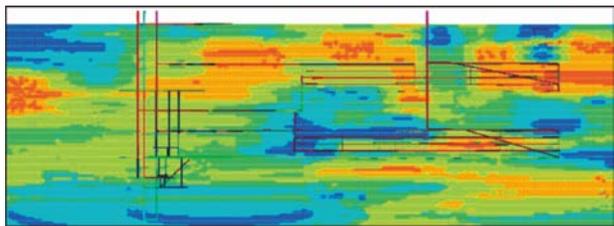


图3 纱岭金矿三维可视化工程灾害模型

Fig. 3 3D visualization model for engineering disaster for Shaling Gold Mine

#### 1.4 深部采矿设计方法研究

地下金属矿山依据地压管理将采矿方法划分为空场采矿法、崩落采矿法和充填采矿法。随着黄金矿山开采深度增加,环境保护意识增强及相关政策规

定,充填采矿法成为黄金矿山开采的首选<sup>[67-68]</sup>。黄金矿山深井开采常用的充填采矿法包括上向水平分层充填采矿法<sup>[69-70]</sup>、上向/下向进路充填采矿法<sup>[71-73]</sup>、机械化盘区上向水平分层充填采矿法<sup>[74-75]</sup>、削壁充填采矿法<sup>[76]</sup>和点柱式分层充填采矿法<sup>[77-78]</sup>等。但上述传统的充填采矿法存在采切工程量大,开拓、采切工艺复杂,安全性差,生产能力小等突出问题,采矿方法与矿山产能及深部开采需求不相适应的矛盾,直接影响深部矿山生产管理系统和未来黄金矿山深部的安全高效开发。深部开采需进一步简化开拓、采准设计,发展大型机械化设备与连续智能化开采,提高矿房回采速度和回采效率,形成标准的钻-爆-运生产循环。因此,采场结构参数对采场及其采动区域稳定性起着决定性作用,也影响着矿山开采技术、经济指标,反映矿山生产技术装备水平<sup>[79-81]</sup>。

为设计合理的采场结构参数,Mathews于1980年首次提出了稳定性图表法,其实质是依据大量工程实例提出的经验公式法,未考虑采动应力影响;1992年,POTVIN等<sup>[82-83]</sup>通过收集更多深部采矿现场数据资料,对稳定性图表法合理性进行验证,考虑深部采动应力影响,提出修正的稳定性图表法;2000年,TRUEMAN等<sup>[84]</sup>根据大量新增的现场实例资料,采用对数回归方法重新定义修正稳定性图表法内的稳定区和严重破坏区;2004年,MAWDESLEY<sup>[85]</sup>给出了稳定性图表法内稳定区破坏与严重破坏区的等概率图,适用于多类型岩体条件下采场结构参数选择及其稳定性研究,但对采动应力大、岩体质量差( $Q < 1$ )或岩体质量非常好( $Q > 20$ )的采场结构设计适用性差。当前中国对于采矿方法选择与采场结构设计主要以矿床地质条件为基础,辅以计算机模拟优选采场结构参数,确定采场结构参数<sup>[16]</sup>。优化采场结构参数多采用工程类比法<sup>[86-89]</sup>、解析法<sup>[90-93]</sup>、数值分析法<sup>[94-97]</sup>、综合分析法<sup>[98-99]</sup>,对浅部采场结构参数设计具有一定的指导意义。但沿用此方法设计出的深部采场结构尺寸偏大,导致矿山深部采场及巷道稳定性难以保障,采矿损失贫化加剧,甚至无法进行开采<sup>[100]</sup>。

当前浅部金属矿主要以矿床地质、技术经济等为基础,综合考虑国家法律、法规,以“经验法”和“工程类比法”设计采场结构;但随矿山开采深度增加,采动应力亦在增加,需充分考虑采动应力对采场结构(形状)稳定性的影响,以采动岩体结构损伤失稳过程响应为基础,以采场形状、采动地压响应为主要变量,引入系统科学、数学等理论,研发采场结构量化设计方法,根据矿山地质和生产情况自适应设计采矿结构,开发智能采场结构设计系统(见图4)。三山岛金矿在无人采矿实验区建设中将原有的进路式充填采

矿法替换为连续机械化分段空场嗣后充填采矿法<sup>[101-103]</sup> (见图 5), 该采矿方法采用下向中深孔爆破成井技术和下向中深孔序次梯段式采场落矿方法, 实现了采矿多工序连续循环作业, 提高了采矿工艺的连续性和生产效率, 降低了采矿损失贫化; 采用平底结构出矿, 通过搭建运行平台使得人员可远程遥控智能设备, 改善了人员生产作业环境, 最大程度保证作业安全。

### 1.5 深部采场爆破落矿技术

钴爆法因对地质条件适应性强、成本低且效率高, 在未来很长一段时间将是金属矿床开采的主要手段<sup>[104-105]</sup>。对于深部黄金矿床开采而言, 高地应力对岩体爆炸应力与爆炸能量的分布有着重要影响<sup>[106-107]</sup>, 因此, 深部高应力岩体开挖的爆破参数设

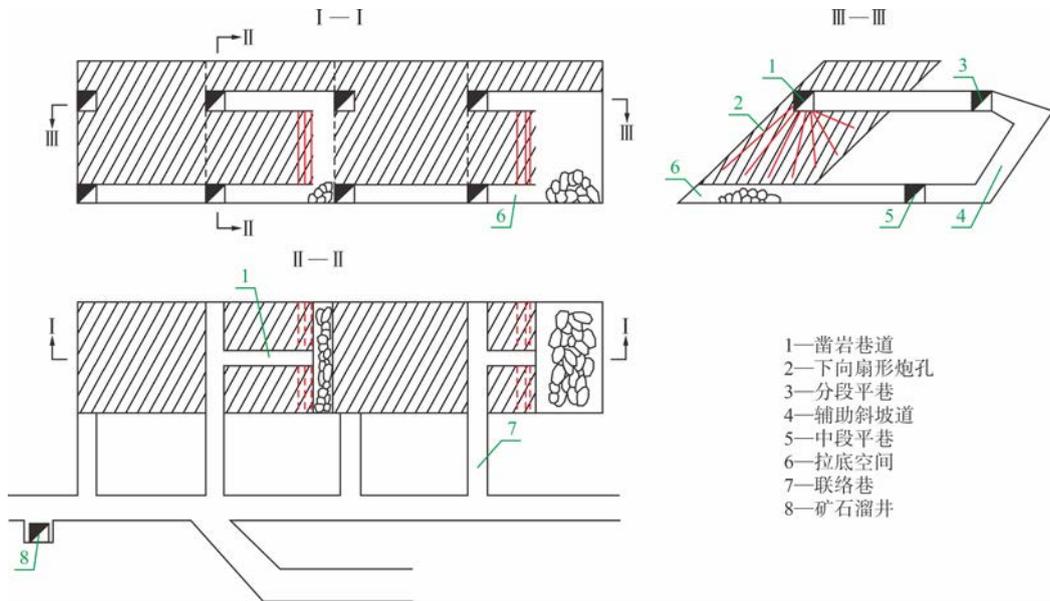


图 5 连续机械化分段空场嗣后充填采矿法

Fig. 5 Continuous mechanized open-room and subsequent filling mining method

计方法应当与浅部不同。然而, 中国当前大部分矿山采场爆破参数的确定主要依据经验类比法, 采场爆破设计缺乏理论和试验依据, 例如: 几乎所有采用 165 mm 大直径深孔落矿的国内地下矿山, 其炮孔孔网参数均为 3 m × 3 m, 很少根据矿山具体岩体情况去优化爆破参数。对于深部采场爆破而言, 由于其受到三向不等采动应力的影响, 其爆破能量和爆破裂隙的分布具有方向性, 因此, 爆破孔网参数的设计应当充分考虑地应力的大小和方向<sup>[108-109]</sup>。开展现场爆破漏斗试验, 对于优化采场爆破参数具有重要意义。

切割天井作为切割槽爆破的初始自由面和补偿空间, 对切割槽的形成质量及后续爆破落矿作业影响巨大<sup>[110]</sup>。由于围岩夹制作用大, 掘进量大, 且施工困难, 因此切割天井掘进方法一直是业界关注的一项关键技术<sup>[111]</sup>。采用常规的普通法、吊罐法或爬罐法掘进天井存在工作环境恶劣、安全性差、成本高、效率

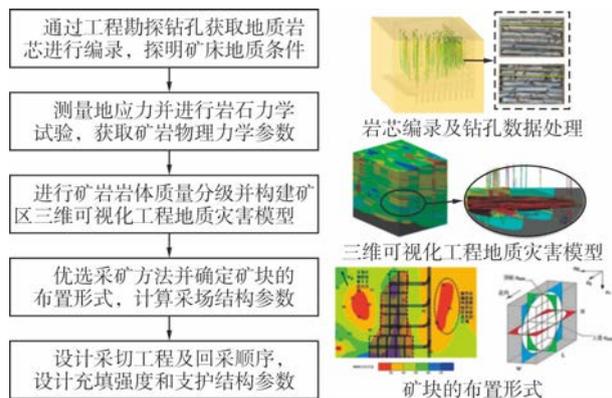


图 4 基于矿体特征与采动地压响应的采场结构设计流程

Fig. 4 Design process of stope structure based on ore body characteristics and mining-induced ground pressure response

低的问题; 采用钻井法则存在施工机械庞大, 施工准备时间长, 设备购置费用高的问题; 深孔爆破法则有效率高、安全性好、成本低、施工工艺简单的优点, 是值得推广的成井技术<sup>[112]</sup>。对深孔爆破法掘进天井模式和参数的选择成为深孔爆破成井法成败的关键。近年来, 随着对深孔爆破成井法掏槽爆破机理、掏槽方式、爆破参数的研究<sup>[113-116]</sup>, 深孔爆破成井法逐渐从分层或分段爆破的 VCR 法成井模式向直孔掏槽模式转变, 一次成井高度可达 15 m 左右, 对于断面较大的天井, 一次成井高度甚至可达 32 m<sup>[117]</sup>。西藏某矿山实施的切割天井孔网参数见图 6, 其中红色炮孔为装药孔, 孔径 165 mm, 药卷直径 140 mm, 采用分段微差爆破技术成井, 一次成井高度可达 15 m 左右。此外, 数值模拟技术的发展为确定合理的爆破参数提供了依据, 沙溪铜矿切割井爆破过程岩体损伤演化规律模拟结果<sup>[118]</sup>见图 7。由图 7 - b) 可知, 数值模拟结

果和现场试验结果一致,说明数值模拟技术可以有效模拟岩体的爆破损伤过程,因此,通过建立合理的数值模型,可为爆破参数的优化提供参考。

电子数码雷管的普及,为采场大规模落矿提供了技术支撑。通过合理的微差时间,可以达到控制爆破振动强度的目的,课题组开发了适用于深部采场爆破落矿的下向扇形深孔梯段式爆破落矿技术(见图8),通过三步法完成采场爆破落矿,减少了爆破辅助作业时间,提升采场落矿效率,减少了采场围岩暴露时间,便于地压防控。利用倒阶梯形便于爆破能量向下传递、减小侧向爆破能量的特点,削弱了侧向崩矿对邻近充填体损伤大的缺点。通过增大两次爆破的炮孔排间距以提升爆破能量利用率,改善爆破效果,试验采场爆破参数见图9,整个试验采场一共包含3次爆破。爆破后现场照片见图10。由图10可以看出:采场侧帮裸露出充填体,充填体完整性好,无大范围垮塌,采空区形态与设计采场形态基本吻合;而崩落的矿石块度较为均匀,大块较少,爆破效果较好。

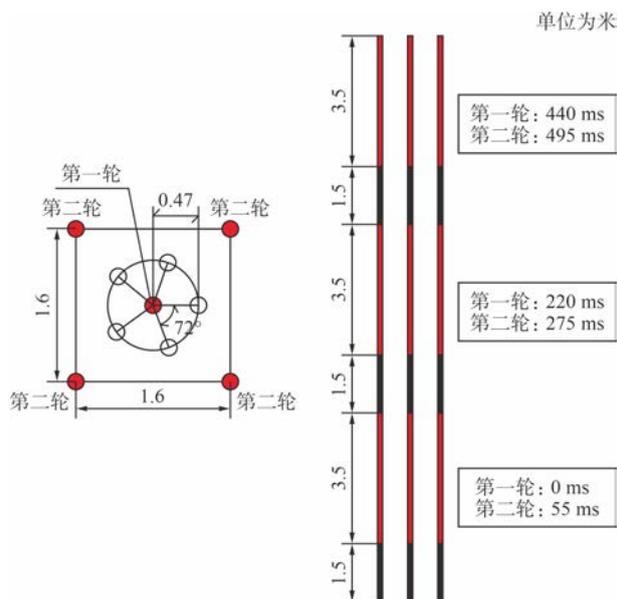


图6 西藏某矿山切割天井孔网参数

Fig. 6 Bored slot network parameters of slot raises in a mine in Xizang

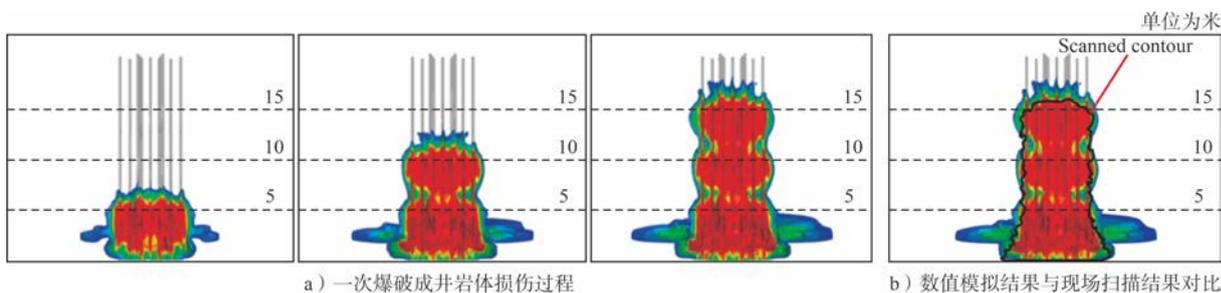


图7 一次爆破成井岩体损伤演化过程<sup>[118]</sup>

Fig. 7 Evolution process of rock mass damage during shaft formation by one single blasting

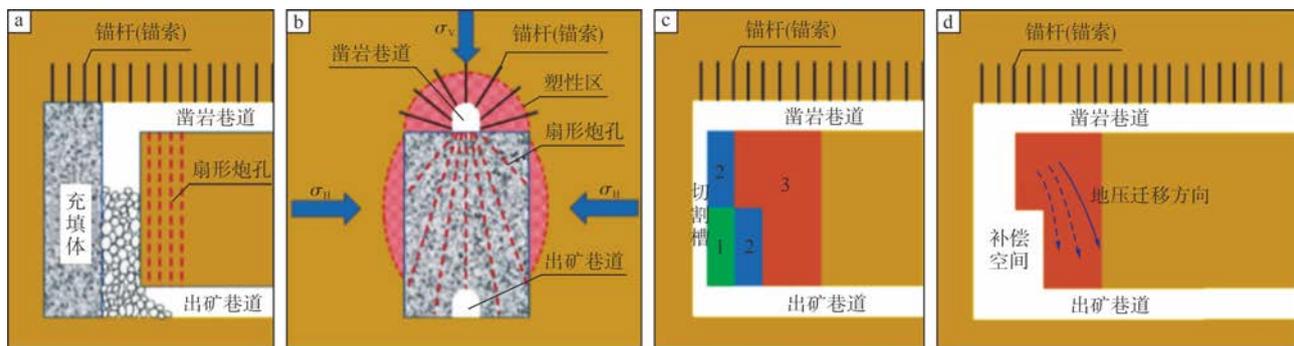


图8 下向扇形深孔梯段式爆破落矿技术

Fig. 8 Downward fan-shaped long-hole blasting staged blasting mining technology

### 1.6 采动地压调控

随着开采深度增加,采动应力亦在增加,这需要在原采场结构设计理论的基础上,充分考虑采动应力对采场结构设计的影响。原岩应力是存在于地层中的天然应力<sup>[119]</sup>,是在没有开挖扰动情况下岩体处于平衡状态的地应力。井巷工程的开挖和矿体的回采会打破原始的平衡状态,导致原岩应力向围岩释放进

而重新达到平衡状态,同时会引发岩体的变形和向自由面的移动。在这个过程中出现的应力集中将导致井巷工程和采场的变形甚至破坏和失稳(见图11)。因此,需要通过有效手段减轻因开挖导致地压显现造成的围岩变形破坏。

采动顺序是提高采场/巷道稳定性和提高矿山产量的核心内容,深部采场需布置在低应力环境,也需

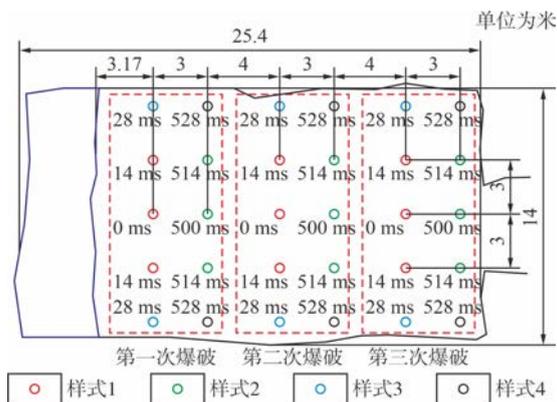


图 9 试验采场爆破参数设计

Fig. 9 Blasting parameter design in experimental stope

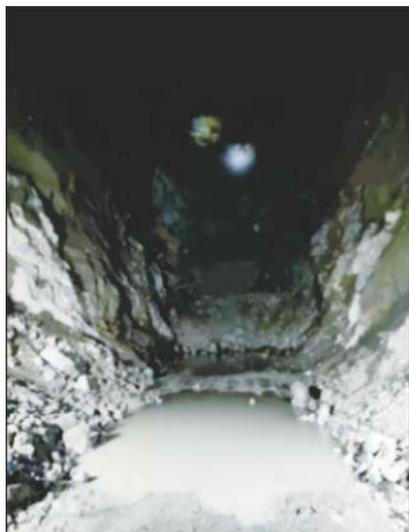


图 10 试验采场爆破效果

Fig. 10 Blasting results in experimental stope

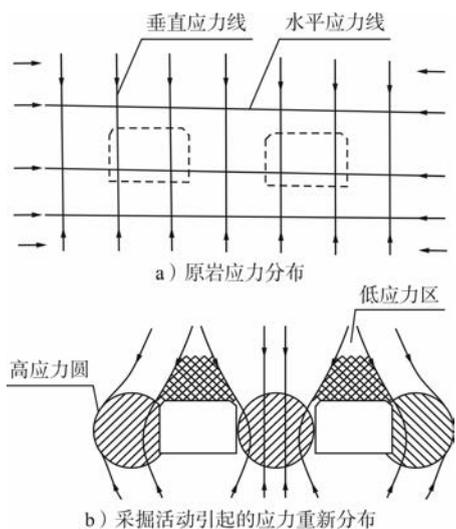


图 11 应力分布示意图

Fig. 11 Schematic diagram of stress distribution

要考虑本步开采对于后续采场应力分布的影响,避免在矿体回采过程中部分区域出现较为严重的应力集中或者变形破坏。开采顺序优化研究的实质是研究

各个开挖步骤采场顶板应力状态和变形状态,进而区分各个开挖步骤对于采场、巷道等稳定性的影响大小。依据开挖工程中围岩应力分布及变化规律,找到井巷工程开挖和采场回采工程中应力集中区域,通过一定的手段使围岩中集中的应力向围岩深处释放,保证井巷工程和采场围岩的稳定性,保证矿山开拓、采准和回采工作的有序进行。

国外使用释压开采法<sup>[120]</sup>,通过顺序网格采矿的方式,基于应力迁移原理,通过采场结构布置方式和回采顺序角度,将巷道或采场周围应力向围岩深处释放进而在巷道或采场周边围岩中形成一个较低地应力区域,在围岩深处形成一个承载较高地应力的区域,以此控制巷道或采场围岩中的应力集中现象,一定程度上预防可能出现的岩爆<sup>[121]</sup>。南非 Elandsrand 金矿为世界上最早应用顺序网格采矿的矿山<sup>[122]</sup>,通过合理布置矿柱改善了开采过程中工作人员和设备的安全。

关于采场开采顺序优化进行了大量的研究,主要从采场稳定性角度区分各个开采顺序的优劣,进而设计针对特定矿体赋存条件的最优开采顺序,将应力调控原理引入采矿回采顺序优化,某矿山回采顺序见图 12。数值模拟研究了不同开采顺序下采场应力、位移演化规律,据此确定上行式开采的顺序采场顶板应力、变形均较小,为最佳开采顺序方案。

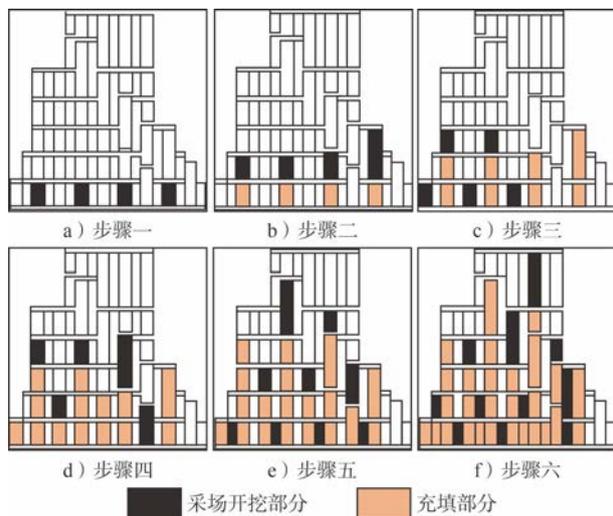


图 12 采矿回采顺序示意图

Fig. 12 Schematic diagram of mining and extraction sequence

当前中国采矿地压调控以免压拱理论为主,但对于深部强采动诱发的动力破坏是深部采动地压防控需要解决的瓶颈问题。因此,对于深部黄金矿床开采,应从矿山整体采动顺序考虑,正反演不同开采顺序下采动地压响应,研究地压响应与采动顺序动态互馈的释压调控机制,提出超前序次释压机理;从力学更高层次上研究矿山整体采动失稳过程应力场迁移

时空演化机制与采掘工程、采矿顺序间协同作用机制,依据采动岩体动力响应特征进行深部采动地压灾害防控。

### 1.7 采动地压监测

采动地压监测是高采动应力区判识、采动地压灾害预警和防控的关键。传统地压监测集中于围岩应力和变形的监测,但通过在国内多座深部硬岩矿山开展的应力和位移监测实践表明,钻孔应力计和单(多)点位计监测效果均不太理想,突出表现为:在

采动过程中钻孔应力计数值几乎无变化,单(多)点位计数值仅在发生宏观破裂面后才发生显著改变<sup>[123]</sup>,难以真实反映深部硬岩采动地压岩体破裂失稳形变过程。据此,提出微应变监测方法感知硬岩微小变形演化过程,纱岭金矿采用微应变传感器监测采动岩体形变演化过程(见图 13),揭示了深部围岩应力状态存在压应力向拉应力的转换过程<sup>[124]</sup>,可见微应变监测能够为采动岩体失稳破坏预测提供关键信息。

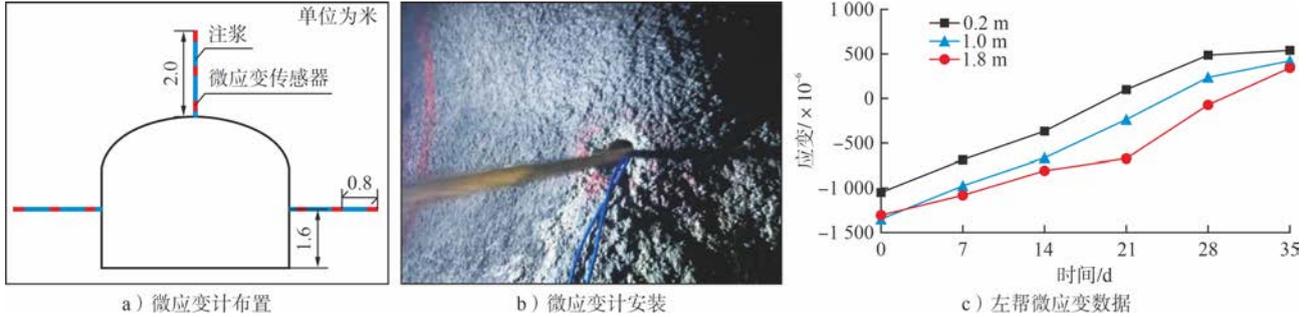
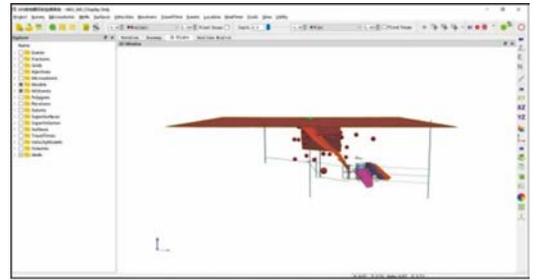


图 13 纱岭金矿巷道围岩微应变监测

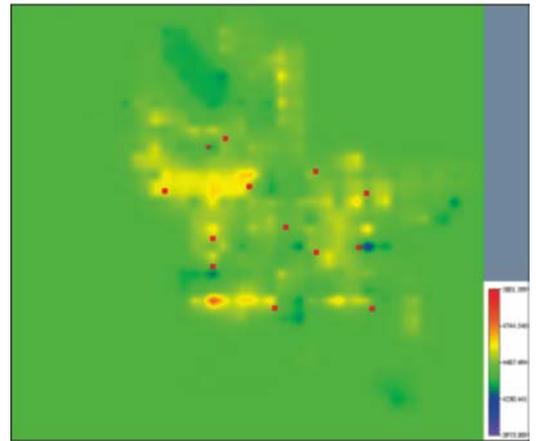
Fig. 13 Micro-strain monitoring of the roadway surrounding rock in Shaling Gold Mine

微地震监测是分析采动岩体破裂失稳和岩爆预警的有效工具<sup>[125]</sup>,对于矿区范围采动地压监测和灾害预警提出了基于微地震监测的深部采动岩体层析成像方法。该方法主要以地震检波器为信号采集工具,必要时辅以传统微震检波器。典型微地震监测系统各组成单元均位于地表,布设若干独立微地震台站,数据传递以传统 4G 网络为主,具有成本低、维护便捷等优点,但存在垂直方向定位精度低的问题,是未来需要攻克的难题。当前,典型的微地震监测系统由若干微地震监测台站、通信网络和配套处理软件组成,研发的 MS 微地震实时监测软件(见图 14 - a)),可对微地震事件进行实时的滤波、到时拾取、定位、震源参数计算。目前,已在三山岛金矿地表安装首套微地震监测系统,实现对井下爆破事件和岩体破裂事件实时监测<sup>[126]</sup>。在后处理过程中,微震事件的统计学规律、空间分布特征、*b* 值演化规律、能量和震源机制解均会提升对采动岩体响应的理解程度。采动诱发的微地震与数值模拟互馈的分析方法可实现应力、岩体破坏等与微地震监测数据的高度融合交互显示,以有效分析采动诱发的应力集中区范围及潜在地压灾害评估,也可为下一步回采顺序设计提供精准指导。鉴于采动应力、微地震事件分布密集区和高应力分布区具有良好的一致性<sup>[125]</sup>,可以采用基于微地震监测的层析成像技术为采动高应力区识别和采动地压灾害防控提供依据。三山岛金矿 - 650 m 水平 P 波层析成像云图见图 14 - b),可以依据波速高低

识别出高应力区分布范围,也反映出应力分布的不均匀性。



a) MS 微地震实时监测软件



b) 三山岛金矿 -650 m 水平 P 波层析成像云图

图 14 三山岛金矿微地震监测系统及部分层析成像云图

Fig. 14 Microseismic monitoring system and partial tomographic imaging cloud map of Sanshandao Gold Mine

地下开采矿山中采掘活动及其他人员、设备活动区域均存在持续不断的振动信号,此类在时间、空间分布都极不规则的振动在地震和勘探领域称为微动,

振动信号称为微动信号。微动信号既包含体波也包含面波,微动信号中的面波能量占70%以上,所以常利用面波信息来研究地下横波速度结构,实际应用中常利用面波信号中的瑞利波。微动信号的振幅和形态随时空的变化而变化,但在一定的时空范围内具有统计稳定性,可用时间和空间上平稳随机过程加以描述,也可以平稳随机过程理论为依据,从微动信号中提取面波的频散曲线,通过对频散曲线的反演获取地下横波速度结构<sup>[127]</sup>。通过岩石波速异常分析,识别矿山断裂构造、岩层结构与裂隙发育区和采空区的分布情况。三山岛金矿微动探测试验中探测出的采空区分布见图15。

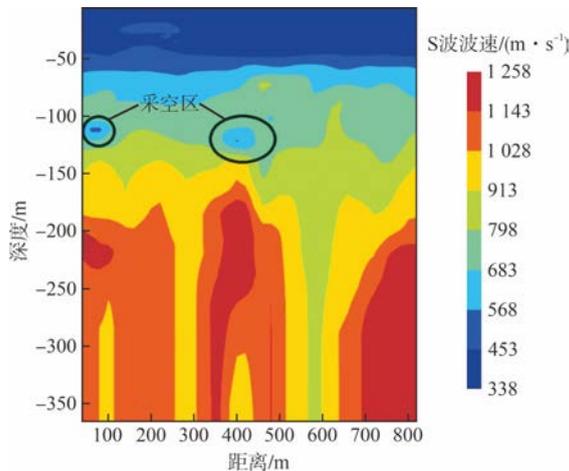


图15 三山岛金矿浅部空区微动探测结果  
Fig. 15 Shallow goaf microseismic detection results of Sanshandao Gold Mine

### 1.8 自承载主动释压支护技术

深部高应力条件下的采场/巷道地压防控是当今世界深部采矿面临的重要技术问题之一。随着金属矿开采深度的不断增加,地应力随之增大,采场/巷道地压显现剧烈。深部采动岩体失稳主要表现为静力型破坏和动力型破坏2种类型。静力型破坏指在深部采场/巷道出现的层裂、剥落、折曲等无动力弹射现象的脆性破坏;动力型破坏指深部采场/巷道出现的岩块弹射、崩落、岩爆等现象<sup>[128]</sup>。ZUBELEWICZ等<sup>[129-130]</sup>认为,岩爆是在岩体的静力稳定条件被打破时发生的动力失稳过程。岩爆诱发采场/巷道围岩表面动力响应特征主要为:破坏时有响声,表现为岩块弹射、爆裂剥落、岩体抛掷性破坏等<sup>[131-132]</sup>;其最显著的动力破坏特征是采场/巷道围岩表面1 m厚的岩体以5~10 m/s速度向采场/巷道内抛出<sup>[133-134]</sup>,抛掷距离达10~20 m,弹射能为5~20 kJ/m<sup>2</sup>,最大弹射能可达到50 kJ/m<sup>2</sup><sup>[135]</sup>,严重威胁井下作业人员和设备的安全。

国外矿山对深部强采动下采场/巷道地压防控问

题研究较早,取得了大量的研究成果,并积累了丰富的实践经验,具有代表性的是加拿大、南非和北欧等<sup>[136-137]</sup>。早在20世纪90年代,南非首先提出了释能支护体系<sup>[136]</sup>。《加拿大岩爆支护手册》<sup>[135]</sup>中设计了抗岩爆冲击的释能支护系统,并在有岩爆倾向性的区域使用。这是由于在岩爆倾向区域采用释能支护系统,尽管矿体开采时发生了多起矿震、高震级的岩爆事件,都没有造成较大的破坏,而使矿体安全采出。

中国对于深部采矿诱发的岩爆冲击型地压控制仍沿用浅部静止型地压分析理论与支护设计方法,无法有效控制深部强采动诱发岩体动力破坏;对于深部强采动诱发的岩爆冲击型破坏,应以岩体动力响应、能量耗散与释能原理为基础,充分考虑支护刚度、释能能力、往复动荷载冲击等因素,研发一种既能有效释放积聚在岩体表面的高应变能,又能抵抗冲击荷载作用的动力支护系统,为有效控制或减轻深部采动地压灾害奠定基础。

通过对比释能锚杆的结构组成、作用机制及优缺点,研发了一种既具有Cone锚杆的整体滑移释能能力,又具有D锚杆多点锚固作用的新型J释能锚杆<sup>[138]</sup>。J释能锚杆是一种能够有效防控岩爆等动力冲击的锚杆。当岩爆发生时,既能保持高静止拉拔力,又可通过杆体产生一定滑移或形变以释放积聚在岩体内的动能,降低岩爆等动力冲击造成的破坏。J释能锚杆(见图16)由螺母、垫圈、托盘、杆体与搅拌端组成,分为锚固(阻尼)模块、变形模块、搅拌模块、锚固端4个部分。在锚杆安装过程中,搅拌模块能均匀搅拌树脂药卷或水泥卷,锚固模块实现多点锚固。在动力冲击下能够使锚杆杆体在锚固剂中产生一定的整体滑移,快速释放积聚在岩体表面的动能。释能支护作为一种先进的支护技术,是主动支护的重要类型之一。

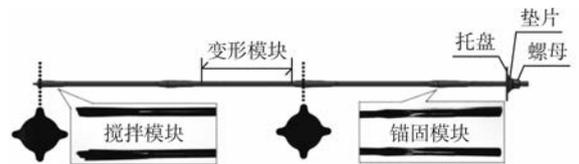


图16 J释能锚杆结构示意图

Fig. 16 Schematic diagram of J energy-releasing bolt structure

现场实践证明,锚杆支护最大的问题是支护参数的确定缺乏足够的科学依据。大部分矿山虽然采用了先进的锚杆支护,但由于支护参数选择不合理和施工过程的不合规,导致大量的支护结构体失效。究其根本原因是矿山对锚杆支护的支护力学机理缺乏足够的认识。自承载主动支护结构主要是当锚杆锚固于巷道顶板的破碎区以后,锚杆的两个端部将会形

成一个圆锥形的压应力场,此时,若合理选择锚杆的间距,锚杆间形成的圆锥形体将会彼此叠加,形成一个拱形的自承载压应力区,该区可以自主承受岩体上方的径向应力,提高岩体的整体承载强度。自承载主动支护结构区(见图17)为系统研究自承载主动支护结构承载能力,通过物理模型构建了自承载主动支护结构(见图18),表征了极破碎岩体在锚网支护作用下可以抵御强动力冲击带来的影响,岩体内部的应力分布云图也直观地表明锚固力、锚杆间距和锚杆长度等参数合理选择的重要性及金属网和喷射混凝土等辅助支护对锚杆支护的协调作用。研究表明,形成有效的自承载主动支护结构的关键是锚杆的作用机理和锚固力。基于岩体 Hoek - Brown 强度准则和自承载主动支理论,采用极限平衡法则对锚杆的锚固力进行了推导,发现锚杆的锚固力是一个受岩体质量、锚固长度、锚杆间排距和巷道几何形状多参数影响的函数<sup>[139]</sup>。该公式从理论层面对自承载主动支理论下的锚杆支护力学作用机理进行了阐释,并应用于矿山实际生产的支护设计。

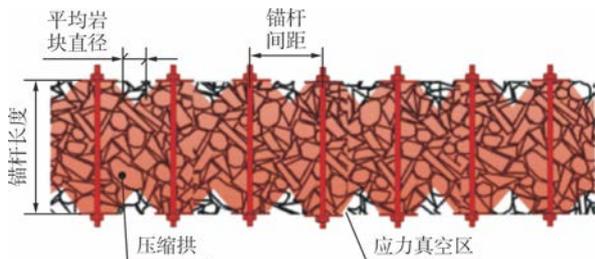


图 17 破碎岩体支护机理示意图

Fig. 17 Schematic diagram of fractured rock mass support mechanism



图 18 破碎岩体锚网支护动力冲击试验

Fig. 18 Dynamic impact test of bolt - mesh support in fractured rock mass

## 1.9 深部采动对地表岩移影响

随着金属矿地下开采的持续进行,矿体采出破坏了初始地应力平衡,使围岩发生持续破坏并产生移动,岩体移动发育至地表将造成不同程度的地表移动变形。国内外对于浅部地下开采地表移动规律、预测方法及控制理论等的研究较为成熟,已经能够满足浅部正常地质采矿条件下的工程需要,但对深部开采条件下,覆岩及地表移动机理、预测方法及控制理论尚不完善<sup>[140-141]</sup>。国内外部分学者结合矿山地表实测数据和力学分析,对深部开采引起的地表沉降问题进行了研究,论述了深部开采的地表沉降规律和特点,表明深部开采与浅部开采相比地表移动有以下特征:①地表影响范围相对大、变形值小;②地表下沉及移动速度小、周期长;③地表移动变形连续,不连续形变减少或者消失<sup>[142]</sup>。

对于地下开采移动范围的划分,传统矿地下开采移动范围的确定主要根据地质构造、地应力、围岩性质、矿体厚度、矿体倾角、开采深度、采矿方法等因素,通过工程类比法、极限平衡法等确定岩体移动角,划定剖面移动范围,进而得到矿山地下开采移动范围<sup>[143-144]</sup>。对于深部开采矿山,采用此种方法进行移动范围划分将导致地表移动范围过大,致使矿山企业不得不扩大地表移动保护范围、扩大征地面积,增加开采成本,因此深部开采金属矿山多结合数值模拟进行矿山移动范围划分<sup>[145]</sup>。通过二维或三维数值模拟提取数据,计算某种变形值,但由于临界变形值的单一性和对于不同建(构)筑物适用性,圈定结果可进一步优化。

深部采矿诱发地表沉降监测的变形参数主要有水平垂直变形、倾斜度、曲率等,其中,对于水平方向长度较长的建筑物曲率变化将使建筑物部分位置处于拉伸状态,容易造成建筑物发生失效损坏;对于地表高宽比较大的建筑物,地表倾斜度较大则可能发生倾斜倒塌;对于竖井、巷道硐室等井下建(构)筑物,水平或垂直变形将可能引起建(构)筑物发生拉伸破坏<sup>[146-147]</sup>。因此,可通过结合三维数值模拟和地表沉降监测数据、开采范围内建(构)筑物种类和保护等级,参考安全规程及其各种变形进行改进并计算,圈定深部开采移动范围。

## 1.10 通风降温技术

随着世界范围内矿井开采深度的持续增加,高温矿井将会越来越多,深部开采面临的高温热害问题愈发严重<sup>[148]</sup>。目前,矿井深部高温热害问题已经成为继矿井岩爆、矿井水害、冲击地压、顶板塌方之后的又一严重灾害,但其危害程度要超过其他灾害,因为高温热害不仅具有持续性,而且还会引起二次灾害,可

以说矿井高温热害防治水平将直接制约未来矿山深部开采的极限深度<sup>[149]</sup>。

从国内外矿井的现场实际数据来看,南非斯太总统金矿的工作面深度超过3 000 m,原岩温度高达63 ℃;罗宾孙金矿开采深度2 700 m,原岩温度41.1 ℃;澳大利亚北部的Mount Isa铜矿,在深度为2 000 m时,原岩温度60 ℃;加拿大Creighton多金属矿在2 400 m深度时,原岩温度48 ℃。纱岭金矿开采深度达1 200 m时,井下温度超过31 ℃;三山岛金矿开采深度达1 500 m时,井下温度升至35 ℃~43 ℃;新城金矿开采深度达1 030 m时,井下温度达到33 ℃~35 ℃。由此可见,许多矿井到达深部后,原岩温度和采场风温都显著升高,危害人体健康,降低劳动效率,严重恶化井下作业环境,影响安全生产<sup>[150]</sup>。

国内外众多学者研究发现,在矿井高温热害治理领域,矿井通风降温技术已经形成了相对完善的体系,其大致可以分为非人工制冷降温技术和人工制冷降温技术两类。其中,非人工制冷降温技术主要包括增加风量、隔绝热源、预冷风流和个体防护等方法<sup>[151-152]</sup>。由于非人工制冷技术主要适用于热害程度不高的矿井,且根据矿井的热源属性,只能针对性地解决部分矿井的高温热害问题,对于高温热害严重的矿井更多的还需依靠人工强制制冷技术<sup>[153]</sup>。早在1860年,在美国内华达州弗吉尼亚城的康斯塔克矿就利用矿车将冰运送到井下,起到了降温作用,这

是人类第一次主动进行井下降温。经过半个世纪的缓慢发展,20世纪初,矿产资源需求量大、开采技术发展迅速的国家对矿井降温技术方面的研究得到了蓬勃发展。1915年,巴西莫劳约里赫金矿建立了世界上第一个矿井空调系统,在地面建立了集中制冷站,采深2 000 m,围岩温度50 ℃,采用活塞式制冷机,可将温度由30 ℃冷却到6 ℃。1923年,英国彭德尔顿煤矿第一个在采区安设制冷机,冷却采面风流。德国最早于1924年在拉德劳德(Radlod)煤矿地面安设冷冻机,采深968 m,围岩温度44 ℃,可将风温由22.5 ℃降到19.5 ℃。澳大利亚Mount Isa铜矿采用制冷系统对进入主风井的空气进行预先冷却,可以将风温从26 ℃冷却到14.6 ℃。加拿大Kidd Creek多金属矿安装了制冷系统,以冷却3 000 m深部的35 ℃风温。南非20世纪60年代开始使用大型矿井集中式空调,利用冰冷技术来降温,最深的Mponeng金矿,埋深3 500 m的温度达到60 ℃左右,通过通风和冷冻充填物技术,可以将空气温度冷却到32 ℃左右。20世纪70年代开始,苏联、日本等国应用制冷降温。21世纪之后,降温技术已发展成熟,逐渐走向集成化、节能化,以及高效化。

从发展历程看,不同的降温系统具有各自的技术特点,不同的冷媒介质也有不同的材质特性,在工程实际中需要根据矿井的实际情况选择合适的冷媒和制冷方式(见图19)。

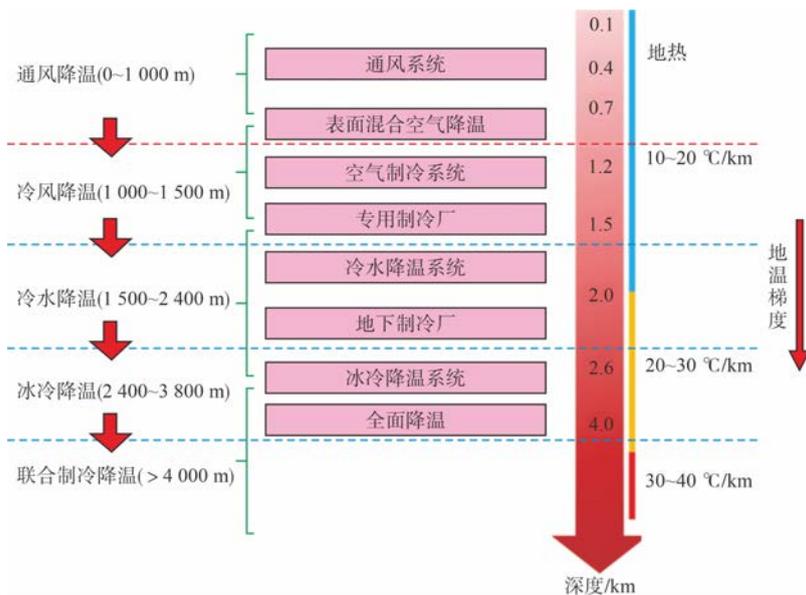


图19 不同深度和温度梯度下的冷却媒介和制冷方式

Fig. 19 Application of cooling media and refrigeration methods under different depth and temperature gradients

与国外相比,中国对矿井热害问题的研究工作起步较晚,起始于20世纪60年代中期。从第一个矿井局部制冷降温系统的研发开始,后续研制了矿用冷水机组用于工作面降温;设计建立了中国第一个地面集

中制冷空调系统。进入21世纪后,冰冷却低温辐射降温技术、HEMS降温技术<sup>[154]</sup>、热-电-乙二醇低温制冷矿井降温系统、冷媒水喷淋降温技术、特种矿用制冷装置、涡流管降温技术、新型空冷器、移动式换热

降温设备等相继登上矿井降温的舞台<sup>[155-156]</sup>。近期,东北大学提出了深井低碳冷源降温系统,该系统主要原理是利用冷源系统中的地热能量交换设备获取大地恒温带的稳定冷源能量,将得到的冷源水由隔热管路送至千米深井,利用井下基站内的换热设备对冷源流体和高温风流进行热交换,将降温后的低温冷风排至高温巷道进行降温,换热后的热余水由管路排至地表水池,以进行二次利用,具有节能、低碳、环保、冷源稳定,余热可利用等特点,达到了地面制冷—井下换热的目的。以按需冷却为理念,开展了移动式冰媒降温设备的相关研究<sup>[156]</sup>。该设备利用冰的相变高溶化热能量对内部循环水进行冷却降温,从而获得高品位冷源,再由核心翅片管换热器完成热交换,每秒换热量可达 156 kJ,具有结构简单,布置灵活,组装便捷,冷源稳定可控,换热效率高,应用范围广等特点。

### 1.11 智能开采技术

知识经济产生于 20 世纪 40 年代的信息技术革命,特别是 20 世纪 80 年代兴起的高科技革命<sup>[157]</sup>,对传统采矿工业起着推动和改变作用,因此研制智能矿山设备,采用遥控和自动控制技术,在无组织性的矿井环境中控制矿山设备,实现井下高难采、高危险下少人、无人化智能开采<sup>[158]</sup>,是 21 世纪矿业的重要发展方向。

地下金属矿自动化开采研究始于 20 世纪 60 年代,遥控作业的设备包括凿岩、铲装、运输与提升等设备<sup>[159]</sup>。早在 1970 年,瑞典 Kiruna 矿井下主要运输水平的机车运输就实现了在控制室内遥控铲运机装卸、电动卡车无人驾驶,将监控、自动化和遥控系统集成在控制中心,直接遥控凿岩台车 Simba46W 及由机载计算机与导航系统控制 Toro2500Es 装载机;瑞典制订了向矿山自动化进军的“Grounteknik - 2000”战略计划。美国 Arizona 大学将人工智能、模糊逻辑技术应用于铲运机的控制,开发了一种智能铲运机,能自适应地对装载体积、装载条件进行识别,最大可能地发挥铲运机的机械性能。1992 年,芬兰采矿工业宣布了智能矿山技术方案,涉及实时过程控制、资源实时管理、全矿范围信息网、新机械及其自动化等 28 个专题。1996 年,加拿大 Comlink 与 Saskatchewan 碳酸钾公司合作,开发了世界上首例无人操作、连续作业的采矿机;20 世纪 90 年代初,加拿大 INCO 公司同 IBM 公司合作<sup>[160]</sup>,在加拿大 Stobie 矿、Creighton 矿,进行了多项遥控采矿试验,包括自动凿岩、自动装药与爆破、自动装岩、自动转运、自动卸岩和自动支护等,并在 1994 年多伦多 CIM 年会上进行了现场展示;1999 年 6 月,将上述 3 座矿山的遥控采矿试验集中在萨德伯里地区的一个中央控制室内进行远程操控;1992 年,加拿大国际镍公司、鹰桥公司和诺兰达

技术中心组成联合研究组<sup>[161]</sup>,为 Precarn 联合公司完成了以无线电通讯为基础,实现数控采矿环境地下硬岩采矿自动化研究;Tamrock 公司的 3 台 Data Solo 自动化钻机在 Stobie 矿连续应用了 4 年,效果良好;诺贝尔公司的 Roc Mec 2000 装药设备,能根据钻机提供的信息把各种乳胶炸药装入炮孔内;加拿大 INCO 公司制定未来 25 年机器人采矿计划,即 2050 年远景计划<sup>[162]</sup>,通过对加拿大北部边远地区一个矿山实现机械破碎或切割采矿,建设地下选矿厂,在 Sudbury 通过卫星操纵地下所有设备自动作业,使地下开采硫化镍矿的成本降低至澳大利亚露天开采红土型氧化矿的水平。

当前,中国贵州锦丰金矿、青海大柴旦矿业公司等部分地下金属矿山已经全部实现机械化采矿,并建立了一套比较完整的自动化集中调度、控制系统,实现了铲运机、运输卡车等机械设备运行全过程的实时状态监控。三山岛金矿、新城金矿等地下矿山实现了井下有轨运输的连续智能化运输;紫金矿业、招金矿业等所属矿山都已应用视距遥控铲运机连续出矿;三山岛金矿等地下矿山实现了铲运机的地面远程遥控。

从以上对比分析可以看出:地下连续智能化采矿虽然难度大,但遥控采矿、无人工作面甚至无人矿井等已在加拿大、瑞典、美国、澳大利亚等成为现实;中国部分地下金属矿山局部已经实现了视距操控、地面远程遥控的无人工作面,但与国外相比,距离无人矿井仍有很大差距。随着信息技术的不断发展,特别是云技术、大数据、虚拟现实技术的出现与发展,使得矿山连续智能化开采技术达到三维可视化并实现远程智能控制是十分可行的。

随着矿山开采深度的增加,深部开采条件严重劣化,采动地压大,造成深部开采效率明显下降、生产成本增加、安全性差,浅部以“矿石流”为基础连续智能化开采工艺和连续作业环节<sup>[163-165]</sup>的智能采矿思维已不能满足深部开采需求。但对于深部连续智能化开采,需突破浅部以“矿石流”为主的智能开采工艺系统研究,充分考虑深部采动应力场均衡及采动地压响应的影响,将矿床地质、地质灾害、岩石力学有机融入深部采矿设计与采掘计划中,开发集采动地压分析、采掘计划管理、连续生产管控、生产智能调度于一体的矿山智能开采三维可视化虚拟交互平台,通过采动地压分析、泛在信息采集,进行矿山生产动态模拟;依据采掘计划分析深部采动地压响应,动态反馈调整采矿计划,沉浸交互式调度井下生产设备;通过海量开采数据解析,研发生产过程智能化管控平台,实现井下生产全流程的连续生产智能管理及三维可视化呈现,优化生产过程。

### 1.12 超深竖井建设

随着国内深部矿产资源勘探技术的提高,大量金属矿产资源不断被发现,而深部矿产资源的开采需要高效的竖井建设,因此对超深竖井建设提出更高要求。“十一五”时期,据不完全统计,中国金属矿超1 000 m竖井建设数量达到30个,形成掘进深度达1 200 m,直径多为6 m的深竖井建造能力。在“十二五”期间,中国竖井建设深度处于1 200~1 500 m,井筒净直径扩大至10 m,开始接近超深竖井建设深度<sup>[166]</sup>。“十三五”时期,中国竖井建设技术达到新的高度,建设深度接近或超过1 500 m<sup>[167]</sup>。“十四五”期间,中国竖井建设深度基本在1 500~2 000 m,开始向2 000 m逼近,三山岛金矿正在进行约2 000 m超深竖井建设,目前建设深度已超过1 580 m<sup>[168]</sup>。当前中国正处于超深竖井建设的初步阶段,由于深部“三高一扰动”、地质条件的复杂性,不确定性因素、未知因素更多、更复杂化,建井工程条件显著变化,建井过程中必然面临一系列工程问题,给建井工程带来的风险显著提高。

长期以来,中国竖井建设采用短段掘砌及与之配套的伞钻、大型抓岩机、整体移动金属模板等成套工艺及技术参数进行掘砌正规循环作业,循环进尺以5 m为主,月成井可达100 m以上<sup>[150,169]</sup>。随着竖井建设深度增加,浅部竖井支管理念与设计方法、施工工艺等在深井建设中已不再完全适用,亟待改进与优化,因此提出超深竖井超前释压理论与技术,为超深竖井建设提供参考。该理论核心思想是克服传统“随掘随砌”施工方法和依靠提高衬砌混凝土强度及厚度加强井筒围岩支管理念,通过序次提高井壁衬砌与井筒掘进工作面距离( $HUS = 5D$ ),释放积聚在井筒围岩内的高应力。设计卸压爆破、释能支护系统主动调控未衬砌段井筒围岩受力状态与应力分布特征,支护结构将逐渐承载围岩应力重分布产生的变形压力,释放井筒围岩内集中的高应力,减小其影响范围。将围岩

变形、支护约束及井筒开挖面的空间约束分开考虑,确定支护时机和合理支护方式。此后在井筒衬砌低强度等级混凝土支护井筒围岩。该项理论与技术分别在思山岭铁矿1 503 m超深井筒、新城金矿1 527 m超深井筒进行现场工业试验,效果良好<sup>[170-171]</sup>。

在井筒掘进过程中,由于掘进工作面以下工程地质环境隐蔽、复杂多变,使超深竖井在建设过程中面临未知风险,井下突涌水是矿山中较为严重的一类地质灾害,并且高承压、强富水环境引发的突涌水灾害威胁日益严重,复杂的充水水文地质条件导致井筒突涌水致灾因素复杂、机理多变、类型多样、影响因素增多,成为超深竖井安全建设的巨大挑战。多起工程案例表明<sup>[172-175]</sup>,井下突涌水一旦处理不当,极易造成淹井事故。矿井水害的发生需满足涌水源和导水通道2个条件,涌水源可通过地质调查、超前探测等手段获知,导水通道则通过注浆方式封堵。针对目前竖井工作面短探、短注工艺复杂,无法超前预报井筒深部地层情况,揭露水治水,施工效率低等技术缺陷,提出超深竖井超长段探水高压驱水注浆技术。该技术以“不揭露水治水”为总要求,执行“有掘必探,探注结合”的方针。通过采取超长段钻孔探测,探测深度120 m,同时利用工程地质调查与物探方法辅助探测,多手段相结合获取地层深部含水层分布信息。采用三维激光扫描、CT扫描及核磁共振技术,获取岩层孔隙、裂隙信息,选择相适应注浆材料。针对深部高应力地层,因地制宜利用基岩岩帽代替止浆垫进行高压注浆,最终达到靶向注浆的目的。超长段探水高压驱水注浆技术通过在三山岛金矿约2 000 m超深竖井建造过程中试验应用,注浆堵水率达到90%,真正做到不揭露水治水。目前,1 500 m以深超深竖井建设相继完成的有思山岭铁矿(1 503 m)、新城金矿新主井(1 527 m)、纱岭金矿(1 551.8 m)和三山岛金矿在建2 005 m超深竖井建设(见图20)。



图20 1 500 m以深超深竖井建设

Fig. 20 Construction of ultra-deep vertical shafts with depth of at least 1 500 m

## 2 发展趋势

岩体是天然地质体,具有非连续、非均匀及各向异性等特征,特别是在深部差异化采动下(多重采动应力场交互作用及爆破等动力冲击下),采动岩体应力变形复杂多变,因此,构建反映深部采动岩体损伤机制及其响应特征的本构关系,是解决深部采场结构设计理论、地压灾害防控机理、深部连续智能化开采的关键共性理论瓶颈;揭示深部采动岩体损伤响应及其本构关系是深部采场结构设计与安全开采所需解决的关键共性科学问题。未来黄金矿山深井开采主要有以下几方面发展趋势:

1)非爆采矿机器人研制。钻爆法开采在未来很长一段时间仍将是黄金矿山开采主要的落矿技术手段,需要充分研究破岩机理,以破岩机理为理论依据,发展硬岩非爆采矿机器人是未来无人采矿的基础,但硬岩非爆采矿机器人开发需要克服很多难题,仍有很长的路要走。

2)采动岩石力学。深部开采打破深部原岩应力场均衡,采动岩石在强采动应力作用下将发生与浅部截然不同的地压显现形式,需要依据矿山实际开展地应力测量,进行采动应力分析;依据大量地质勘探数据、岩石力学数据和岩体结构数据,系统研究强采动应力作用下采动岩体失稳变形特征,发展采动岩石形变本构和判据,揭示深部采动岩体地压响应及其形变规律,为深部采场结构设计、采动地压调控和智能开采提供理论依据,以提高深部采场结构设计的科学性、经济性和安全性。

3)深部采动地压灾害防控。充分考虑矿床地质、岩体力学、地质灾害风险与采掘活动的内在关联性,提出构建矿山三维工程灾害分析模型及其方法;开发现场监测与区域差异化采动数值模拟互馈的研究方法,研究深部差异化动态采动诱发多尺度岩体非线性变形-损伤-破裂-失稳过程及其响应,揭示深部采动岩体损伤机理及其本构模型,探索深部采场结构失稳位移场、能量场迁移规律及其时空响应;建立以采场形状、采动地压为主要变量的深部采场结构设计理论及其智能设计方法;研究岩体动力响应、释压机制与背景应力场迁移规律耦合关系,提出超前序次释压机理与释能支护系统,建立以采动地压均衡与主动释压防控的深部采动地压灾害防控理论与技术。

4)深井降温技术。自然风流只能解决1 000 m以深矿体开采1/3的降温问题。深井高温热害随深度增加的威胁逐渐增大,由于井下热源的复杂性和多样性,多种方式组合的联合降温体系的构建势在必行,以绿色高效、换热效率高、冷源可控等为研究导

向。深部通风降温技术未来将以按需换热制冷为原则,出于成本和技术条件限制的考虑,深部非必需区域的通风降温会造成能量的不必要消耗,很多矿井对通风降温系统进行优化和升级,以按需通风为原则,意图减少能耗。那么,深部降温时的按需制冷也同样重要,根据工作面的温度要求,在井下只对必需区域进行局部通风降温以达到减少能耗的目的,最大程度实现井下通风降温和能源合理利用之间的相对平衡,因此,在黄金矿山深井开采设计过程中,需要充分考虑通风降温系统开发与设计,以解决深部黄金资源开发降温难题。

5)超深竖井建设。近10年来,黄金矿山超深竖井建设取得了长足发展,不断刷新国内超深竖井建设纪录,纱岭金矿刚完成1 551.8 m超深竖井建设,三山岛金矿正在建设2 005 m超深竖井,当前该竖井建设深度已达1 568 m。未来三山岛金矿2 005 m超深竖井稳定建成,将是中国超深竖井建设具有典型代表的一面旗帜。但深竖井提升问题,将给国内超深竖井研究带来新的研究课题,因此,超深竖井提升装备是未来发展亟须解决的难题。

6)基于采动地压均衡的深部连续智能化开采技术。智能化、无人化开采必将成为未来黄金矿山深井开采乃至整个采矿业发展的主流方向。通过进一步推进黄金矿山数字化技术进步,包括更先进、更精确的传感器技术,更智能、更全面的大数据分析技术等实现从地质勘探到矿山开采的矿山生产数据可视化和采矿工艺流程透明化,建设透明矿山。在透明矿山的基础上,研发先进无人开采设备,进一步推动以大数据分析与人机智能算法为导向的矿山生产工艺智能化,矿山生产管理智能化及矿山生产经营智能化,实现少人化、无人化的矿山开采和管理,最终建成安全、绿色、高效、高产的无人化生产矿山。

当前中国地下金属矿连续智能化开采主要针对井下有轨/无轨作业装备实行局部远程可视化操控调度,而在矿山范围内进行多采区、多类型装备的系统整合和一体化方面比较薄弱,且未考虑深部采动应力场均衡与采动地压响应的影响;因此,对于深部连续智能化开采需以采动应力场均衡及采动地压响应为背景,构建以开采顺序、生产智能调度、生产过程管控与海量开采信息解析相融合的矿山智能开采三维可视化虚拟交互平台,形成全时空域沉浸交互式连续智能化采矿工艺系统。依据采动应力场均衡及采动地压响应,开发集采动地压分析、采掘计划管理、连续生产管控、生产智能调度于一体的矿山智能开采三维可视化虚拟交互平台,系统分析采掘计划对深部采动地压响应的敏感性,动态反馈智能调整采掘计划,智能

调度井下生产设备,形成深部金属矿连续智能化安全开采成套理论与技术,为黄金矿山深部安全、高效、智能开发提供科学依据和技术保障。

### 3 结 语

当前,中国有近20座黄金矿山开始步入深部开采,部分黄金矿山开采深度已经超过1500m,本文仅针对当前黄金矿山深井开采面临的岩石力学、岩体结构面识别、矿山三维工程灾害建模、岩体质量分级、采矿方法、采场结构设计、采场爆破、回采顺序、采动地压控制、深部开采对地表影响、释能支护、通风降温、智能开采技术、超深竖井建设等理论和关键技术,结合近些年所做的工作进行了概述,但对于深部地质勘查、透明矿山、探水注浆、膏体充填等系列问题未进行分析,所涉及的内容基础是结合科研所涉及的矿山对于问题的总结与分析,在这些矿山中,部分矿山是在原有工程基础上进行深部黄金资源开采的延续,部分矿山直接步入深部开采,二者所面临和解决的问题不尽一致。黄金矿山深井开采是一项系统工程,必须结合矿山生产实际情况,对中国黄金矿山深井开采所面临的问题进行系统的梳理和系统性的研究,从行业整体考虑,采用系统论的方法,解决黄金开采面临的系列难题,真正解决黄金矿山深井开采面临的痛点、难点问题,取得的科研成果经过矿山生产实践验证,切实解决生产难题,才能从根本上解决黄金矿山深井开采问题,推动黄金矿山深井开采行业进步。

#### [参考文献]

- [1] 赵兴东. 深部硬岩矿床采动地压与控制[M]. 北京:冶金工业出版社,2019.
- [2] 赵兴东. 超深井建设基础理论与发展趋势[J]. 金属矿山,2018(4):1-10.
- [3] SCHWEITZER J K, JOHNSON R A. Geotechnical classification of deep and ultra-deep witwatersrand mining areas, South Africa[J]. Mineralium Deposita, 1997(32):335-348.
- [4] CHRISTOPHER P. Digging deeper for answers[J]. CIM Magazine, 2017,12(2):36-37.
- [5] TOLLINSKY N. Companies tackle challenges of deep mining[J]. Sudbury Mining Solutions Journal, 2004,1(2):6.
- [6] WILLIES L. A visit to the Kolar Gold Field, India[J]. Bulletin of the Peak District Mines Historical Society, 1991,11(4):217-221.
- [7] SRINIVASAN C, WILLY Y A, BENADY S. Rockburst seismic intensity attenuation model for the Kolar Gold Fields hard rock mining region[M]. SAIMM:Rockbursts and Seismicity in Mines, 2001:1-7.
- [8] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2020[M]. 北京:地质出版社,2020.
- [9] MALAN D F, BASSON F R P. Ultra-deep mining: The increased potential for squeezing conditions[J]. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1998,12:353-363.
- [10] JOHNSON R A S. Mining at ultra-depth, evaluation of alternative[C]//NARMS. Proceedings of the 2nd North America Rock Mechanics Symposium. Montreal: NARMS, 1996:359-366.
- [11] VOGEL M, ANDRAST H P. Alpt transit-safety in construction as a challenge, health and safety aspects in very deep tunnel construction[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000,15(2):147-151.
- [12] WERNIUK J. First stage of Kidd Creek's Mine D project complete[J]. Canadian Mining Journal, 2007,128:10-13.
- [13] MALEK F, SUORINENI F T, VASAK P. Geomechanics strategies for rockburst management at Vale Inco Creighton mine [C] //RockEng09. Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium. Toronto: RockEng09, 2009:1-12.
- [14] DIERING D H. Ultra-deep level mining: Future requirements[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1997,97(6):249-255.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005,24(16):2803-2813.
- [18] 李夕兵, 周健, 王少锋, 等. 深部固体资源开采评述与探索[J]. 中国有色金属学报, 2017,27(6):1236-1262.
- [19] 古德生. 地下金属矿采矿科学技术的发展趋势[J]. 黄金, 2004,25(1):18-22.
- [20] 赵兴东, 张妹婧, 杨晓明, 等. 深部硬岩矿床采动应力理论与解析方法[J]. 现代矿业, 2018,12(12):24-27.
- [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, 2002,18(3):9-12.
- [22] 蔡美峰, EDWIN T B. 深部矿产资源开采与利用中的挑战[J]. Engineering, 2017,3(4):9-12.
- [23] 金俊超, 余成学, 尚朋阳. 基于应变软化指标的岩石非线性蠕变模型[J]. 岩土力学, 2019,40(6):2239-2246, 2256.
- [24] 刘洪永, 程远平, 赵长春, 等. 采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010,29(2):358-365.
- [25] 沈新普, 岑章志, 徐秉业. 弹脆塑性软化本构理论的特点及其数值计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1995,35(2):22-27.
- [26] 胡亚元. 基于混合物理理论的饱和岩石弹塑性模型[J]. 岩土工程学报, 2020,42(12):2161-2169.
- [27] 苏国韶, 冯夏庭. 基于粒子群优化算法的高地应力条件下硬岩本构模型的参数辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 2005,24(14):3029-3034.
- [28] 苗胜军, 杨志军, 龙超, 等. 脆性硬岩 CWFS 强度准则模型等效塑性参数优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013,32(增刊1):2600-2605.
- [29] 张超, 白允. 参数型岩石几何损伤模型的构建及其应用研究[J]. 岩土力学, 2020,41(12):1-11.
- [30] 江权. 高地应力下硬岩弹脆塑性劣化本构模型与大型地下硐室群围岩稳定性分析[D]. 武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2007.
- [31] 江权, 冯夏庭, 陈国庆. 考虑高地应力下围岩劣化的硬岩本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008,27(1):144-152.
- [32] 乔兰, 高稳, 李远, 等. 硬岩 CWFS 模型的改进及其在岩质高边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012,31(增刊1):2593-2600.
- [33] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. Int. J. Rock Mech. Sci. Geom. Abstr, 1997,34(8):1165-1187.
- [34] ALEJANO L R, RODRIGUEZ - DONO A, ALONSO E, et al. Ground reaction curves for tunnels excavated in different quality rock masses showing several types of post-failure behaviour[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2009,24(6):689-705.
- [35] PARK K H, TONTAVANICH B, LEE J G. A simple procedure for ground response curve of circular tunnel in elastic-strain softening rock masses[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2008,23(2):151-159.
- [36] CARRANZA - TORRES C M. Self-similarity analysis of the elasto-plastic response of underground openings in rock and effects of practical variables[D]. Minnesota: University of Minnesota, 1998.
- [37] ALONSO E, ALEJANO L R, VARAS F, et al. Ground response curves for rock masses exhibiting strain-softening behaviour[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2010,27(13):1153-1185.

- [38] MOLLADAVOODI H. Ground response curve (grc) and excavation damage zone based on an isotropic damage model [C] // SPRINGER. Constitutive modelling of geomaterials, advances and new applications. Berlin: Springer, 2012.
- [39] WANG S L, YIN X T, TANG H, et al. A new approach for analyzing circular tunnel in strain-softening rock masses [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2010, 1: 170 - 178.
- [40] LEE Y K, PIETRUSZCZAK S. A new numerical procedure for elasto-plastic analysis of a circular opening excavated in a strain-softening rock mass [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23: 588 - 599.
- [41] CUI L, ZHENG J J, ZHANG R J, et al. Elasto-plastic analysis of a circular opening in rock mass with confining stress-dependent strain-softening behaviour [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50(8): 94 - 108.
- [42] ALEJANO L R, ALFONSO R D, MARÍA V. Plastic radii and longitudinal deformation profiles of tunnels excavated in strain-softening rock masses [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 30: 169 - 182.
- [43] CARRANZA - TORRES C, FAIRHURST C. Application of convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek - Brown failure criterion [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(2): 187 - 213.
- [44] KAISER P K, DIEDERICH S, MARTIN D, et al. Underground works in hard rock tunnelling and mining [C] // Technomic Publishing. Proceedings of ISRM international symposium. Lancaster: Technomic Publishing, 2000: 841 - 926.
- [45] DIEDERICH S, ROCK fracture and collapse under low confinement conditions [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2003, 36(5): 339 - 381.
- [46] 殷达, 孟庆祥, 徐建荣, 等. 基于微结构张量的岩石各向异性弹塑性本构及其应用 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1 751 - 1 758.
- [47] 李会云. 考虑高围压和高应变率的岩石类材料弹塑性损伤本构模型 [D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [48] 李晓照, 戚承志, 邵珠山. 高渗透压作用脆性岩石宏细观力学本构模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊 1): 2 593 - 2 601.
- [49] GOODMAN R E. 不连续岩体中的工程地质方法 [M]. 北方交通大学隧道与地质教研室, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1980.
- [50] KULATILAKE P H S W, WU T H. Estimation of mean trace length of discontinuities [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1984, 17(4): 215 - 232.
- [51] ZHANG L, EINSTEIN H H. Estimating the mean trace length of rock discontinuities [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1998, 31(4): 217 - 235.
- [52] MAULDON M. Estimating mean fracture trace length and density from observation in convex windows [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1998, 31(4): 201 - 216.
- [53] VALA DVD, SLANINA Z, WALENDZIUK W. Mining shaft inspection by laser photogrammetry [J]. Elektronika Ir Elektrotechnika, 2016, 22(1): 14109.
- [54] 熊忠幼, 胡瑞华. 边坡摄像快速地质编录 [J]. 水力发电, 1998, 24(2): 27 - 29.
- [55] 李浩, 张友静, 华锡生, 等. 洞室数字摄影地质编录及其基本算法研究 [J]. 武汉大学学报, 2004, 29(9): 805 - 808.
- [56] 范留明, 李宁. 基于数码摄影技术的岩体裂隙隙测量方法初探 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 792 - 797.
- [57] 陈才明, 张雷, 宋浩军, 等. 数字地质编录中的产状量测 [J]. 地矿测绘, 2002, 18(1): 11 - 14.
- [58] 李冬田. 岩坡摄影地质测量与岩坡空间信息系统 [J]. 河海大学学报, 1999, 27(1): 25 - 28.
- [59] 何秉顺, 丁留谦, 孙平. 三维激光扫描系统在岩体结构面识别中的应用 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(1): 42 - 48.
- [60] LEUT S S, CHANG S L. Digital image processing based approach for tunnel excavation faces [J]. Automation in Construction, 2005, 14(6): 750 - 765.
- [61] HOULDING S W. 3D Geoscience modeling-computer techniques for geological characterization [M]. Berlin Heidelberg: Springer - Verlag, 1994.
- [62] 武强, 徐华. 三维地质建模与可视化方法研究 [J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2004, 34(1): 54 - 60.
- [63] 刘少华, 程朋根, 陈红华. 三维地质建模及可视化研究 [J]. 桂林工学院学报, 2003, 23(2): 154 - 158.
- [64] 陈钢花, 郑孝强. 基于 OpenGL 的三维可视化在地质勘探中的应用 [J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28(6): 428 - 431.
- [65] 赵兴东, 王宏宇, 王小兵, 等. 基于智能自学习模型识别岩芯的 RQD 标定方法 [J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(12): 159 - 165.
- [66] 赵兴东, 王宏宇, 白夜. 基于卷积神经网络迁移学习模型的矿岩智能识别方法 [J]. 矿床地质, 2023, 42(5): 1 003 - 1 010.
- [67] 李夕兵, 周健, 黄麟淇, 等. 中国黄金矿山开采技术回顾与展望 [J]. 黄金, 2020, 41(9): 41 - 50.
- [68] 黄乃清, 郎磊. 某金矿复杂地质条件矿体协同开采技术研究 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(11): 8 - 13.
- [69] 贾万玉, 吴若茜, 万串串. 三山岛金矿深部矿体上向水平分层充填采矿法优化研究与应用 [J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(1): 22 - 27.
- [70] 王金波, 何少博, 饶运章, 等. 夏甸金矿深部矿体预切顶灾害隔离开采技术研究 [J]. 金属矿山, 2016(6): 14 - 18.
- [71] 况丹阳, 周玉成, 万串串, 等. 三山岛金矿下向进路采矿法人工假顶参数设计研究 [J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(6): 99 - 103.
- [72] 于常先, 邱云胜, 王禄海. 机械化盘区上向高分层宽进路充填采矿法在三山岛金矿的研究与应用 [J]. 中国矿业, 2012, 21(增刊 1): 310 - 313.
- [73] 李湘洋, 宋卫东, 杨勇, 等. 焦家金矿下向进路充填采矿法人工假顶优化设计及应用 [J]. 黄金, 2020, 41(1): 30 - 33.
- [74] 姜磊, 张君鹏, 李树鹏. 盘区机械化上向水平分层充填采矿法分区充填脱水技术及应用 [J]. 黄金, 2016, 37(11): 32 - 35.
- [75] 赵国彦. 机械化盘区上向分层充填采矿法试验研究 [J]. 金属矿山, 1999(6): 2 - 5.
- [76] 徐世杰, 梁春贵. 辽宁二道沟金矿采矿工艺剖析 [C] //《金属矿山》杂志社, 《现代矿业》杂志社, 中国矿业 114 网, 等. 中国矿业科技文汇——2014. 北京: 冶金工业出版社, 2014: 4.
- [77] 王善飞, 王康, 马凤山, 等. 三山岛金矿“三下”开采工艺优化与灾害防治 [J]. 黄金科学技术, 2020, 28(5): 734 - 742.
- [78] 户瑞平, 刘勇, 王永娜. 归来庄金矿采矿方法优化与应用 [J]. 现代矿业, 2022, 38(1): 95 - 97.
- [79] 孙豁然, 周伟, 刘炜. 我国金属矿采矿技术回顾与展望 [J]. 金属矿山, 2003(10): 6 - 9.
- [80] 韩志型, 王维德. 深部硬岩矿山未来采矿工艺的发展 [J]. 世界采矿快报, 1995(33): 8 - 13.
- [81] 王运敏, 黄礼富. 现代金属矿采矿技术发展趋势 [J]. 中国矿业, 2008, 17(增刊 1): 7 - 10.
- [82] POTVIN Y, HUYDYA M R, MILLER H D S. Design guidelines for open slope support [J]. CIM Bulletin, 1989, 82(1): 53 - 62.
- [83] NICKSON S D. Cable support guidelines for underground hard rock mine operations [D]. Vancouver: University of British Columbia, 1992.
- [84] TRUEMAN R, MIKULA P, MAWDESLEY C A, et al. Experience in Australia with the Mathews method for open slope design [J]. CIM Bulletin, 2000, 93(2): 162 - 167.
- [85] MAWDESLEY C A. Using logistic regression to investigate and improve an empirical design method [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(1): 756 - 761.
- [86] STEPHENSON R, SANDY M. Optimising slope design and ground support-a case study [C] // POTVIN Y, BRADY B. Ground support 2013: proceedings of the seventh international symposium on ground support in mining and underground construction. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2013.
- [87] CUI X, YANG S, ZHANG N, et al. Optimization of stope structure parameters by combining mathews stability chart method with numerical analysis in Halazi iron mine [J]. Heliyon, 2024, 10(4): e26045.

- [88] LIU H,ZHAO Y,ZHANG P,et al.Stope structure evaluation based on the damage model driven by microseismic data and Mathews stability diagram method in Xiadian Gold Mine[J]. *Geomatics,Natural Hazards and Risk*,2021,12(1):1 616-1 637.
- [89] LIU H,ZHAO Y,ZHANG P,et al.Stope structure evaluation based on the damage model driven by microseismic data and Mathews stability diagram method in Xiadian Gold Mine[J]. *Geomatics,Natural Hazards and Risk*,2021,12(1):1 616-1 637.
- [90] 孙嘉,刘武团.分段凿岩阶段空场法顶柱和间柱合理参数的确定[J]. *有色金属(矿山部分)*,2012,64(3):21-25.
- [91] 程德富.三山岛金矿破碎矿体开采采场结构参数优选[J]. *黄金*,2017,38(7):30-32.
- [92] 刘建东,解联库,曹辉.大规模充填采矿采场稳定性研究与结构参数优化[J]. *金属矿山*,2018(12):10-13.
- [93] 潘桂海,秦健春.高应力矿体充填法采场结构参数优化研究[J]. *有色金属(矿山部分)*,2018,70(1):20-23.
- [94] 杜永亮,包东程.红岭铅锌矿采场结构参数数值模拟与优化[J]. *采矿技术*,2019,19(3):7-9.
- [95] 晋文.白象山铁矿采场开采结构参数优化设计与围岩稳定性分析[D].青岛:青岛理工大学,2011.
- [96] 梁江波.云南某磷矿灯杆树矿段采场结构参数优化研究[D].昆明:昆明理工大学,2014.
- [97] 刘培慧.基于应力边界法厚大矿体采场结构参数数值模拟优化研究[D].长沙:中南大学,2009.
- [98] MILNE D M. Underground design and deformation based on surface geometry[D]. Vancouver:University of British Columbia,1997.
- [99] EL MOUHABBIS H Z. Effect of stope construction parameters on ore dilution in narrow vein mining[D]. Quebec:McGill University,2013.
- [100] ZHAO X D,NIU J A. Method of prediction ore dilution based on a neural network and its application[J]. *Sustainability*,2020,12:1 550.
- [101] 赵兴东,周鑫,赵一凡,等.三山岛金矿连续规模化智能开采工艺研究及应用[J]. *金属矿山*,2022(5):45-49.
- [102] 赵兴东,曾楠,陈玉民,等.三山岛金矿井下无人开采区域中深孔落矿后充填连续采矿工艺设计[J]. *黄金科学技术*,2021,29(2):200-207.
- [103] 赵兴东,周鑫,魏慧.三山岛金矿分段空场后充填采场结构参数设计[J]. *金属矿山*,2022(1):101-106.
- [104] LI X D,LIU K,YANG J C,et al.Numerical study on blast-induced fragmentation in deep rock mass[J]. *International Journal of Impact Engineering*,2022,170(12):104367.
- [105] WANG P,ZHOU Z,FAN J,et al.Numerical study on fractal characteristic of blast-induced cracks in deep rock mass[J]. *Journal of Physics(Conference Series)*,2024,2738(1):012002.
- [106] 杨建华,彭超,叶志伟,等.深部岩体爆破冲击波能量分布特征[J]. *兵工学报*,2024,45(6):1 735-1 746.
- [107] 肖思友,姜元俊,刘志祥,等.高地应力下硬岩爆破破岩特性及能量分布研究[J]. *振动与冲击*,2018,37(15):143-149.
- [108] 谢理想,卢文波,姜清辉,等.深部岩体在掏槽爆破过程中的损伤演化机制[J]. *中南大学学报(自然科学版)*,2017,48(5):1 252-1 260.
- [109] 谢理想.深埋隧洞岩石爆破破碎演化机制与钻爆优化设计[D].武汉:武汉大学,2017.
- [110] HIMANSHU K V,MISHRA A K,ROY M P,et al.Numerical simulation based approach for assessment of blast induced deformation pattern in slot raise excavation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,2021,144:104816.
- [111] 袁再武.我国天井掘进技术现状[J]. *长沙矿山研究院季刊*,1985(1):37-43.
- [112] 李启月,李夕兵,范作鹏,等.深孔爆破一次成井技术与应用实例分析[J]. *岩石力学与工程学报*,2013,32(4):664-670.
- [113] 李启月,徐敏,范作鹏,等.直眼掏槽破岩过程模拟与空孔效应分析[J]. *爆破*,2011,28(4):23-26.
- [114] 周传波,谷任国,罗学东.坚硬岩石一次爆破成井掏槽方式的数值模拟研究[J]. *岩石力学与工程学报*,2005,24(13):2 298-2 303.
- [115] 周传波.深孔爆破一次成井模拟优化与应用研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2005.
- [116] LIU K,LI Q,WU C,et al.A study of cut blasting for one-step raise excavation based on numerical simulation and field blast tests[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,2018:10991-104.
- [117] LIU K,LI Q,WU C,et al.Optimization of spherical cartridge blasting mode in one-step raise excavation using pre-split blasting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,2020,126(C):104182.
- [118] HUO X F,SHI X Z,QIU X Y,et al.A study on raise blasting and blast-induced vibrations in highly stressed rock masses[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*,2022,123(5):101407.
- [119] HOEK E,BROWN E T. *岩石地下工程(译)*[M].北京:冶金工业出版社,1986.
- [120] PATRICK A,JOHN H. The destressability index methodology for the assessment of the likelihood of success of a large-scale confined destress blast in an underground Mine pillar[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,2008,45:407-421.
- [121] 陈庆发.隐患资源开采与采空区治理协同研究[D].长沙:中南大学,2011.
- [122] 谢袖生.深部金属矿山卸压开采研究[D].南宁:广西大学,2013.
- [123] 赵兴东,朱乾坤,代碧波,等.深部金属矿超前序次释压机理与调控方法研究进展[J]. *金属矿山*,2023(8):153-161.
- [124] 秦绍龙,赵兴东,呼亚洲,等.深部硬岩巷道围岩变形特征及其控制技术[J]. *金属矿山*,2023(12):9-13.
- [125] ZHU Q,ZHAO X,WESTMAN E. Review of the evolution of mining-induced stress and the failure characteristics of surrounding rock based on microseismic tomography[J]. *Shock and Vibration*,2021(1):2154857.
- [126] 王照亚,曾楠,王立君,等.三山岛金矿地表微地震系统监测竖井爆破定位方法研究[J]. *采矿技术*,2023,23(4):152-156.
- [127] 王康东.基于地震成像技术的矿山采空区探测研究和应用[D].合肥:中国科学技术大学,2022.
- [128] 钱七虎.深部岩体工程响应的特征科学现象及“深部”的界定[J]. *东华理工学院学报*,2004,27(1):1-5.
- [129] ZUBELEWICZ A,MROZ Z. Numerical simulation of rock burst process treated as problems of dynamic instability[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*,1983(16):253-274.
- [130] MUELLER W. Numerical simulation of rock bursts[J]. *Mining Science & Technology*,1991(12):27-42.
- [131] 徐林生,王兰生,李天斌.国内外岩爆研究现状综述[J]. *长江科学院院报*,1999,16(4):24-28.
- [132] 谭以安.岩爆类型及防治[J]. *现代地质*,1991,5(4):112-120.
- [133] ORTLEPP W D,STACEY T R. The need for yielding support in rockburst conditions, and realistic testing of rockbolts[J]. *Proceedings International Workshop on Applied Rockburst Research*,1994(5):249-259.
- [134] JAGER A J,WOLNO L Z,HENDERSON N B. New developments in the design and support of tunnels under high stress[C]//South African Institute of Mining and Metallurgy. Proceedings international deep mining conference:Technical challenges in deep level mining. Johannesburg:South African Institute of Mining and Metallurgy,1990:1 155-1 172.
- [135] KAISER P K,MCCREATH D R,TANNANT D D. Rockburst support[J]. In *Canadian Rockburst Research Program*,1997(2):324.
- [136] PLAYER J R. Field performance of cone bolts at Big Bell Mine[C]//VILLAESCUSA E,POTVIN Y. Ground support,2004,proceedings 5th international symposium ground support in mining & underground construction. Perth:CRC Pree,2004.
- [137] FALMAGNE V,SIMSER B P. Performance of rockburst support systems in Canadian mines[C]//VILLAESCUSA E,POTVIN Y.

- Ground support 2004, proceedings 5th international symposium ground support in mining underground construction. Perth: CRC Press, 2004.
- [138] 赵兴东,朱乾坤,牛佳安,等.一种新型J释能锚杆力学作用机制及其动力冲击实验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(1):13-21.
- [139] QIN S,ZHAO X,SONG J,et al. Mechanical mechanism and theoretical analysis of anchor net support based on model test and numerical simulation[J]. Geomatics Natural Hazards & Risk, 2024,15(1):2350484.
- [140] 曹鑫.唐口煤矿深部充填开采地表变形规律研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [141] 张国建.巨厚弱胶结覆岩深部开采岩层运动规律及区域性控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
- [142] 李培现.深部开采地表沉降规律及预测方法研究[D].徐州:中国矿业大学,2012.
- [143] 张文举.充填开采安全深度与保安矿柱圈定研究[D].武汉:武汉理工大学,2017.
- [144] 赵雁海.电塔下多煤层开采地表沉降与充填减沉规律研究[D].太原:太原理工大学,2015.
- [145] 宋恩祥,赵磊,蔡淦,等.某金矿岩石移动带内地表构筑物稳定性分析[J].现代矿业,2022,38(3):87-89,92.
- [146] 宋旻.急倾斜厚大矿体开采覆岩及地表移动规律研究[D].赣州:江西理工大学,2022.
- [147] 童大志,汪杰.基于数值模拟的红岭铅锌矿岩层移动带圈定[J].有色金属(矿山部分),2019,71(5):10-13.
- [148] 王运敏,李刚,徐宇,等.我国深部矿井热环境调控研究近20a进展及展望[J].金属矿山,2023(3):1-13.
- [149] 柳静献,李国栋,常德强,等.矿井降温技术研究进展与展望[J].金属矿山,2023(7):18-27.
- [150] 何满潮.深部开采工程岩石力学现状及其展望[C]//中国岩石力学与工程学会.第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集.北京:中国矿业大学(北京),2004:7.
- [151] 李夕兵,黄麟淇,周健,等.硬岩矿山开采技术回顾与展望[J].中国有色金属学报,2019,29(9):1828-1847.
- [152] 赵兴东,赵思宇,李昂,等.深部通风三维仿真模拟研究[J].矿业工程,2024,22(3):69-74.
- [153] 王超,张文林,许凤超,等.河西金矿深部热环境调查与分析[J].有色金属(矿山部分),2023,75(6):33-36,65.
- [154] 何满潮,徐敏. HEMS深井降温系统研发及热害控制对策[J].岩石力学与工程学报,2008,27(7):1353-1361.
- [155] 何满潮,郭平业.徐州矿区深部开采热害治理现场试验研究[J].煤炭工程,2015,47(4):1-4.
- [156] ZHAO X,ZHAO S,LI A. Design and analysis of a new type of mobile ice cooling equipment for deep mine[J]. Scientific Reports, 2003, 13:20375.
- [157] 于润沧.硬岩地下采矿发展特点及其前景展望[J].有色金属采矿,1998,86(1):1-7.
- [158] 冯夏庭,王泳嘉.采矿科学的一个新方向—智能采矿学[J].科技导报,1995,13(8):20-22.
- [159] 于润沧.采矿业发展知识经济的思考[J].中国工程科学,2001,3(1):41.
- [160] PATHAK J,UDD J E. Hardrock underground mining in 21st century[C]//Bawden & Archibald(eds). Innovative mine design for the 21st century. Balkema; Rotterdam, ISBN, 1993.
- [161] SCOTT A. Remote mining technology[J]. Engineering and Mining Journal,2002(1):24-27.
- [162] GREG D. Telemining system applied to hard rock metal mining at INCO limited[C]//Proceedings of Mining for Tomorrow's World. Dusseldorf, Germany, 1998:121-124.
- [163] 吴爱祥,胡华,古德生.地下金属矿山连续开采模式初探[J].中国矿业,1999,8(3):28-31.
- [164] 徐东升,戴兴国,廖国燕.金属矿地下连续开采技术探讨[J].中国矿山工程,1999,8(3):36-38.
- [165] 赵兴东.深井采矿发展现状[J].国际学术动态,2020(2):37-38.
- [166] 陈玉民,赵兴东,李洋洋.深竖井建设[M].北京:冶金工业出版社,2021.
- [167] 赵兴东,郑建新,陈玉民,等.新城金矿新主井深孔爆破技术[J].采矿技术,2021,21(4):103-106.
- [168] 赵兴东,武桐,李文光,等.2000m大直径超深竖井新型凿岩提升悬吊系统设计[J].有色金属(矿山部分),2022,74(5):155-159.
- [169] 龙志阳.立井短段掘砌混合作业法及其配套施工设备[J].建井技术,1998(3):2-7.
- [170] 肖瑞玲.立井施工技术发展综述[J].煤炭科学技术,2015,43(8):13-17.
- [171] 赵兴东,李洋洋,赵一凡,等.基于收敛-约束应力分析的超深竖井施工工艺优化[J].采矿技术,2022,22(1):180-182.
- [172] 丁有全,赵家厚,陈跃远.冬瓜山竖井突水机理的初步研究[J].中国地质灾害与防治学报,1997,8(4):84-89,102.
- [173] 王厚良,王松青.深立井井筒突水淹井事故处理[J].建井技术,2007,28(4):3-5.
- [174] 高广义,司景钊,贾建波,等.高黎贡山隧道1#竖井(副井)突水淹井封堵施工技术[J].隧道建设(中英文),2019,39(2):275-280.
- [175] 谢世平.壁后引水注浆在井筒大涌水治理中的应用[J].采矿技术,2018,18(6):92-94.

## Research progress and development trends in deep gold mine mining

Zhao Xingdong

(Key Laboratory of Mine Safety Supervision and Control for Disaster Prevention and Mitigation in Deep Metal Mines of National Mine Safety Administration, Northeastern University)

**Abstract:** This paper details the current research status and technical challenges of deep gold mine mining, discussing in detail theories of mining-induced rock mechanics, rock mass structure identification and rock mass quality classification, mine 3D engineering disaster modeling, study of deep mining design methods, deep stope blasting and caving technology, mining-induced ground pressure regulation and monitoring, self-supporting active pressure relief support technology, impact on surface rock displacement, ventilation and cooling technologies, intelligent mining, and ultra-deep vertical shaft construction. Prospects for future development in areas such as the development of non-explosive mining robots for gold mines, mining-induced rock mechanics, prevention and control of deep mining-induced ground pressure disasters, deep mine cooling technology, construction of ultra-deep vertical shafts, and continuous intelligent mining technology based on the equilibrium of mining-induced ground pressure have been proposed, providing a reference for systematic research on deep gold mine mining.

**Keywords:** gold mine; deep mining; mining-induced rock mechanics; mining methods; ventilation and cooling; intelligent mining; ground pressure regulation; ultra-deep vertical shaft