



期刊官网扫码浏览



更多信息扫码浏览

硬岩矿山开采技术回顾与展望

李夕兵^{1,2}, 黄麟淇^{1,2}, 周 健^{1,2}, 王少锋^{1,2}, 马春德^{1,2}, 陈江湛^{1,2},
刘志祥^{1,2}, 李启月^{1,2}, 赵国彦^{1,2}

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 深部金属矿产开发与灾害控制湖南省重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 以国内外硬岩矿山特别是有色金属矿山开采现状及研究成果为基础, 综述了硬岩矿山开采方法与技术的发展历程和主要进展。随着技术的进步和对安全环保要求的提高, 硬岩矿山地应力探测与地压监测技术更加精准可靠, 传统的空场法、崩落法过渡到充填法, 隐患破碎矿段实现安全高效开采, 大型水(海)下金属矿床实现安全高效低贫损开采, 智能化矿山构建已初见成效, 深部硬岩开采理论与技术正日趋成熟; 同时, 以硬岩矿山技术变革为导向, 以解决深部固体资源开发的瓶颈难题为目标, 系统阐述了变害为利的深部开采方法构思和不同深度的深地资源特别是有色贵重矿物资源的不同开采模式与开采技术构想, 并就深部开采理论难题与技术瓶颈及突破方向进行了探讨, 以期资源开采将向地球深部进军提供理论和技术参考。

关键词: 硬岩矿山; 有色金属矿山; 深部采矿方法; 采矿技术; 非爆连续开采; 变害为利

文章编号: 1004-0609(2019)-09-1828-20

中图分类号: TU45

文献标志码: A

众所周知, 硬岩开采自古至今, 开采模式变化不大, 近几十年来, 随着浅部矿产资源逐渐枯竭, 越来越多的露天矿山转入地下开采, 虽然露天开采设备大型化、边坡角和台阶也逐步增大, 为露天开采深度的增大提供了一些技术保障, 但采矿业的经济性也决定了未来开采将主要是地下开采。但硬岩开采地下三大采矿方法的基本框架没有改变, 实现矿岩分离的破碎方法与维持开采空间稳定的支护技术原理也没有大的变化。由于岩石坚硬, 一直沿用凿岩爆破的方法破碎岩石, 因而与软岩开采(煤炭开采)相比, 实现自动化、连续化难度更大。以煤矿为代表的软岩由于本身强度低、在开采中易于采用机械设备对矿石进行切割分离, 从而有利于实现机械化连续采矿, 目前大部分煤矿都实现了机械化综采, 并在近年来趋向于采用采充一体化作业, 正在逐步实现绿色开采^[1-4]。在硬岩开采中, 因矿岩强度高, 磨蚀性强, 爆破法开采导致生产工艺间断, 生产效率低且安全性差。特别是随着开采深度的增加, 地应力呈线性或非线性增加趋势, 地温升高, 岩体变硬变脆, 地质条件恶化, 由此带来运输提升、岩石力学、通风降温、充填工艺以及生产成本等许多技术问题^[2,5-6]。鉴于我国硬岩矿山的开采现状, 国家

在深部资源开采及深部岩体力学方面进行了大量的科研投入, 先后设立“九五”、“十五”、“十一五”、“十二五”科技攻关项目和十三五重点研发计划, 对深部开采所要攻克的关键问题开展了大量研究, 极大地促进了我国硬岩开采理论与技术的发展。本文作者将在总结硬岩开采技术发展历程的基础上, 就这些年来硬岩矿山特别是有色金属矿山开采技术的进展进行了介绍, 同时就将来矿山走向深部的关键理论与技术问题进行了研讨。

1 硬岩矿山开采的发展历程

1.1 开采模式

广义的硬岩开采, 包括金属与非金属矿开采, 最早可追溯到旧石器时代人们用来开凿石器工具和后来新石器时代开凿各种玉器等, 并从那时开始就有露天开采发展到地下开采的雏形, 而金属矿开采技术最早源于考古中发现铜制品的年代, 距今也大约有几千年的历史, 虽然硬岩开采业伴随人类文明而来, 但在人类发展和工业化进程中是必不可少的支柱产业。时至

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41630642); 国家重大科研仪器研制项目(51927808)

收稿日期: 2019-07-10; **修订日期:** 2019-09-12

通信作者: 李夕兵, 教授, 博士; 电话: 13974870961; E-mail: xbli@csu.edu.cn

今日,没有矿业就不可能有工业、农业与国防现代化,更不可能诞生出如此多彩的现代文明,然而在硬岩开采漫长的发展历程中,每一次技术的进步和发展都显现出人类的智慧和人们对自身繁重体力的解放。

硬岩矿山特别是有色金属矿山开采技术的发展是随着采掘机械与相关工艺技术的进步而发展起来的。现代工业文明之前,人们都是通过井下工人的繁重体力,进行人工开采。20世纪80年代前,随着以7655气动凿岩机、T2和T4机装岩、电耙与漏斗振动出矿等凿、采、装运等设备在矿山的运用,初步实现了机械化开采,进入新世纪后,凿岩台车、遥控铲运机的逐步大规模使用,标志着硬岩开采进入自动化开采阶段,目前硬岩开采正在向智能化开采迈进^[7-8],其构建过程如图1所示。

1.2 采矿方法

硬岩开采中,虽然三类采矿方法及其控制地压的方式没有大的变化,但各类采矿方法也都随着设备及其相关技术的进步在向高效率、高安全性等方向转变(见图2)。以浅眼落矿为主的空场法正在向中深孔落矿嗣后充填法转变,崩落法一方面在追求大崩距高分段

落矿,同时,由于崩落法导致地表大面积陷落,逐渐发展和过渡到以固体废料充填的充填法。因为空场法开采时采空区顶板/矿体由矿柱支撑,随着采矿作业不断进行,采空区范围逐渐增大,顶板暴露面积也逐渐增加,矿柱难以支撑顶板压力后容易垮塌,引起岩层移动^[9]。崩落法不设置矿柱支撑顶板,而是直接崩落围岩用于充填采空区,容易造成地表塌陷。充填法开采时顶板由充填体支撑,围岩变形较小,并且充填体不但可回收再利用大量矿山固体废弃物,而且回收率高,安全性好,因此充填法开采在安全性能和环保等方面具有较大优势,在地下矿山中的应用更为广泛并逐渐取代了前两种采矿法^[10-11]。

1.3 充填技术与工艺

充填采矿的技术和工艺也在不断发展。在20世纪20~40年代,国际上有很多矿山利用砂浆泵或自流方式将尾砂碎石等充填料以固液两相流方式输送至采空区,或将废石、矸石干式充填到井下采空区以降低贫化率,减少提运量。20世纪50~60年代,芬兰的奥拓昆普和中国凡口铅锌矿开始使用胶结充填法,以碎石或尾砂为骨料,与水泥等胶凝材料拌合成浆体,以管

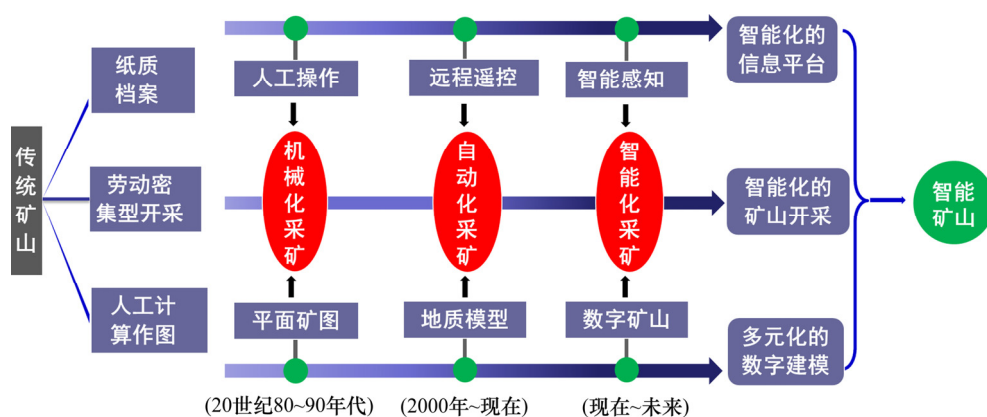


图1 传统硬岩矿山向智能矿山构建过程^[8]

Fig. 1 Construction process of traditional hard rock mine to intelligent mine^[8]

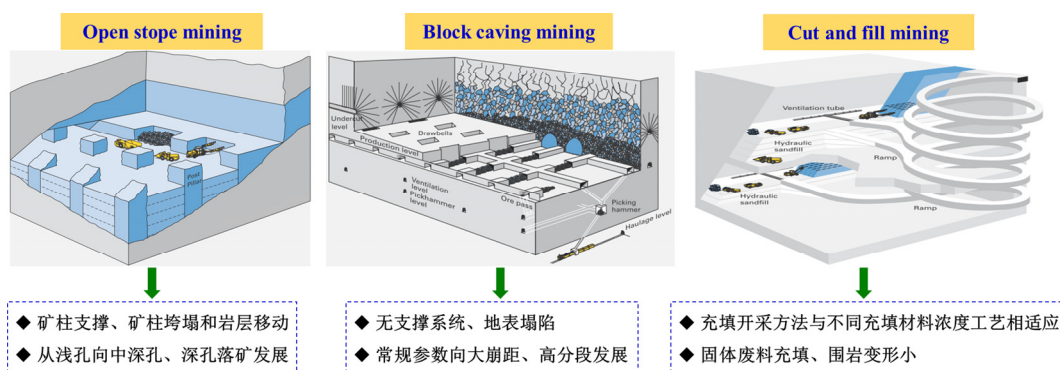


图2 硬岩矿山传统采矿方法及其发展趋势

Fig. 2 Traditional mining methods and development trends in hard rock mines

道泵送或自流方式输送^[12-14]。胶结充填也是目前充填法开采矿山使用最普遍的工艺^[10]。之后,相继出现了全尾砂高浓度充填、膏体和似膏体充填等工艺,如图3所示。

1.4 连续智能化开采

为实现硬岩矿山集约化规模化开采,多年来大家都在探索连续采矿与开采的自动化、智能化,连续化开采也是实现硬岩开采智能化的必要基础。古德生院士在20世纪80年代提出以无间柱连续开采、振动出矿与连续运输列车为主体的金属矿连续开采^[15]。这种方法实现了矿块布置和开采方向的不间断推进,同时也实现了出矿等的自动化,但由于仍采用钻爆法,开采作业工序不连续,且强扰动引起的衍生灾害多,不能实现各作业工序间的真正作业连续。美国、欧盟等矿业发达国家在20世纪90年代曾致力于硬岩矿山开采的连续化,寄希望通过大力研究新型机械破岩与水射流技术来实现硬岩的非爆连续开采技术,但由于能耗大、刀具磨损严重、成本高,未能得到普及^[8, 16-19]。至今,硬岩矿山未能实现真正意义的连续开采^[20-22]。

近年来,智能化采矿也得到了国内外广泛关注。加拿大、芬兰和美国等国家和工业部合作开展“智能采矿”研究与应用已有20多年,给矿业发展带来深远影响^[23]。20世纪90年代,加拿大国际镍业公司INCO联合世界几家著名的设备厂家和研究单位,在加拿大Sudbury的硬岩实验矿山开始了智能化矿山实践,拟于2050年实现无人采矿。该项目通过地下通信系统、定位导航系统、过程工程监测与控制系统等

telemining关键技术实现智能化开采^[8, 24]。芬兰于1992年就成立了智能采矿技术项目计划,开始一系列研究工作^[25-26]。美国1999年开始对地下煤矿的自动定位与导航技术进行研究,获得了商业化研究成果^[27]。英澳矿业巨头力拓集团表示,2021年开始,将耗资22亿美元建成第一个智能矿山^[28]。进入21世纪以来,我国不断有相关项目支持矿山智能化的研发,虽然部分技术已经得到了应用,但整体进展仍然比较缓慢。

综上所述,国际矿业界一直推崇和追求硬岩矿山的智能化非爆连续开采^[8, 20-21],试图实现从单一的生产设计到一体化的科学决策,从高强度的地下爆破开采到全自动化连续开采,从劳动密集型到生产系统的无人化的转变,并通过实现矿山地质数字化、矿山设备智能化、采矿工艺连续化和生产过程信息化,最终完成传统矿山向连续化智能矿山转变,如图4所示。

2 硬岩开采技术的主要进展

2.1 地应力探测与地压监测技术更加精准可靠

随着硬岩开采向隐患破碎矿体、深部高应力矿体、海底基岩矿体等极端环境转变,迫切需要科学采矿、精准采矿和绿色采矿。因此,这些年来,以弄清开采区域地应力状况和了解开采过程地压变化情况为目的的地应力探测与地压监测技术得到了很好的发展。

传统的地应力测量方法主要有应力解除法、水压致裂法和声发射法。图5对各种常见地应力测量方法的工作原理、装备及优缺点进行了简单的阐述,从图5中可以看出,目前地应力测量3种方法各有利弊,



图3 充填采矿技术发展历程^[10]

Fig. 3 Development history of backfill mining technology^[10]

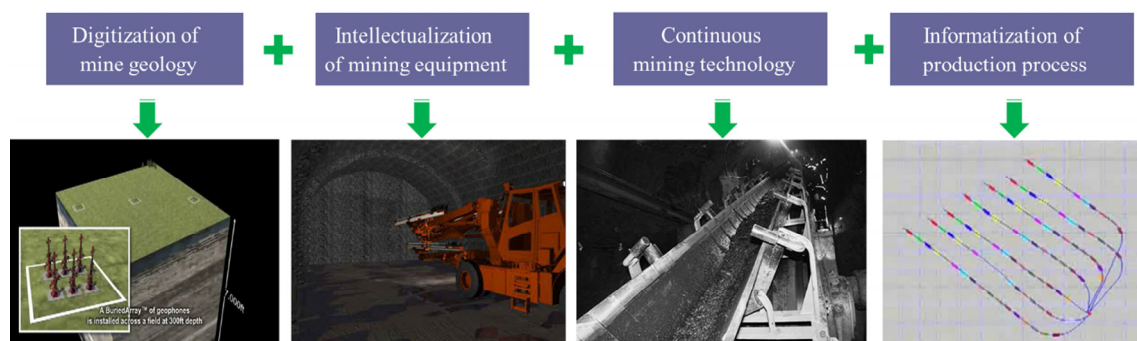
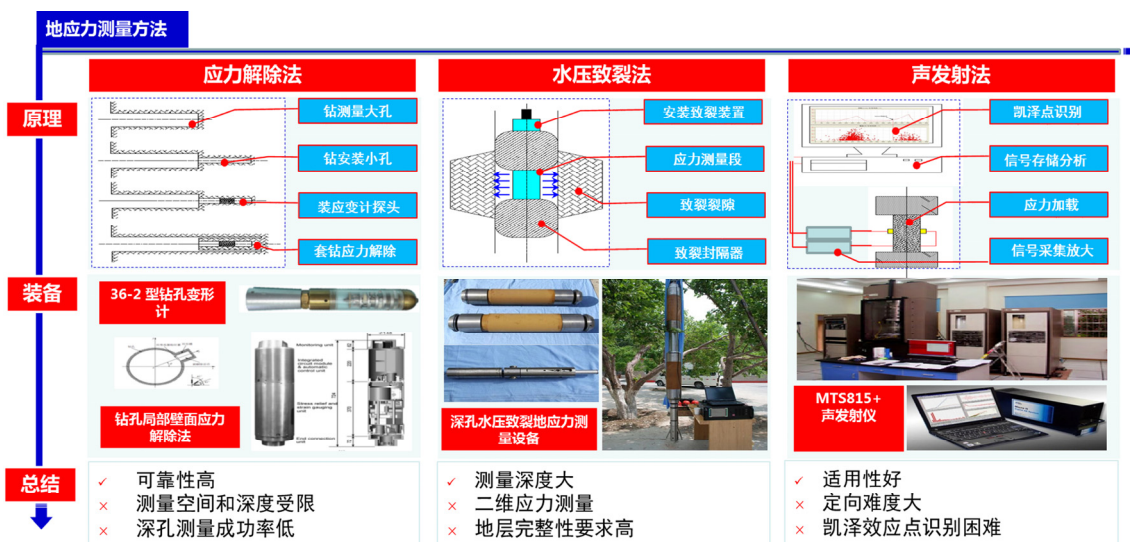
图 4 智能化连续化非爆连续开采模式^[8]Fig. 4 Mining model for intelligent and continuous mining without explosives^[8]

图 5 传统地应力测量方法及特点

Fig. 5 Traditional in-situ stress measurement methods and their characteristics

其中在矿山使用最广泛最有效的方法—应力解除法, 仍然是通过人进入工作面实施, 对于深部条件受到了很大的限制。为充分和精确掌握采矿区域地应力分布情况, 这些传统的地应力测量方法得到了不断完善, 新的测量方法也在相继出现, 地应力测量精度和自动化程度逐渐提高。为解决声发射方法不能辨识主应力方位和深部地应力测量等问题, 我们提出了基于岩芯地表重定位技术的声发射地应力测量方法^[29], 并开发了基于岩芯空间特征重现与声发射参量识别的地应力测量技术, 建立了岩芯空间姿态特征室内自动重现测量平台^[30], 探究了非定向岩芯原位空间四向取芯方法, 完善了非定向岩芯结构面三维重构技术。如图 6 所示, 该方法仅需获得深部普通地质岩芯及其钻孔测斜数据, 无需孔内或洞室内的复杂操作, 具有适应深度大、无操作空间限制、地应力定位准确、经济成本

显著降低等优点。此方法已成功服务于深部开采、超深竖井建设, 并先后在湘西金矿、红岭铅锌矿、三山岛金矿、新城金矿等完成深部三维地应力测量, 测量深度已达 2360 m。为证实该方法的有效性, 我们也曾先后在新城金矿等采用应力解除法和该方法进行了对比(如图 7 所示), 从而证实了该方法的有效性。

在地压监测方面, 以应力计、位移计为代表的多点测量和以微震为代表的区域测量等地压监测预警技术也在不断升级。虽然微震定位得到了快速发展, 但传统方法应用于岩石工程中存在的两个问题仍未根本解决: 1) 在时间上, 不同时刻点岩体中的速度值不同, 爆破标定在微震事件之前, 将爆破标定的速度直接用于微震定位会引起一定误差; 2) 在空间上, 爆破试验中波的传播路径和微震事件波的传播路径可能不同, 所得到的平均波速也大为不同, 直接通过爆破试验单

一路径测定的波时引入计算会导致较大的误差。传统微震定位方法在水电交通隧道工程及煤矿综采作业面中使用相对较为有效,主要是因为水电交通隧道工作面及综采作业面单一,传播路径相对简捷,波传播介质相对均匀,传统方法的两个缺陷引起的误差相对较小(见图8)。然而在硬岩矿山尤其是金属矿山中,巷道纵横交错,采用爆破开挖,多中段多点作业,开采区

域充填体、空区与矿岩共存,传统预先测定波速代替区域波速的方法误差很大。为此,本文作者提出无需预先测速微震震源定位新方法^[31],研发了微震数据自动化处理软件,避免了波速在时间和空间上带来的误差,大幅度提高了定位精度,同时,震源类型辨识效率由百事件识别耗时滞后小时级缩短到秒级,从而基本实现实时震源类型的精准辨识。

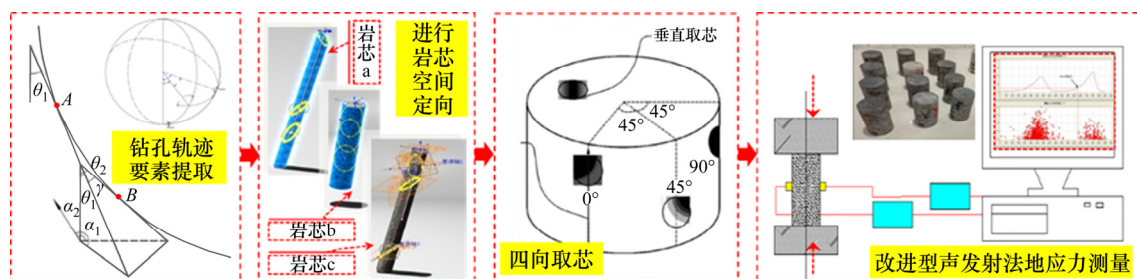


图6 基于岩芯地表重定位技术的声发射地应力测量方法作业流程

Fig. 6 Acoustic emission in-situ stress measurement procedure based on core surface relocation technology

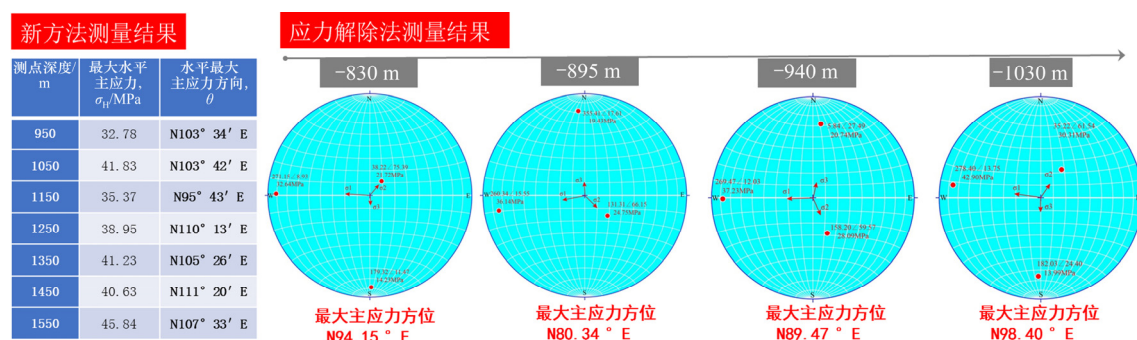


图7 基于岩芯地表重定位技术的声发射地应力测量方法与应力解除法的对比

Fig. 7 Comparison of acoustic emission in-situ stress measurement method and stress relieving method based on core surface relocation technology

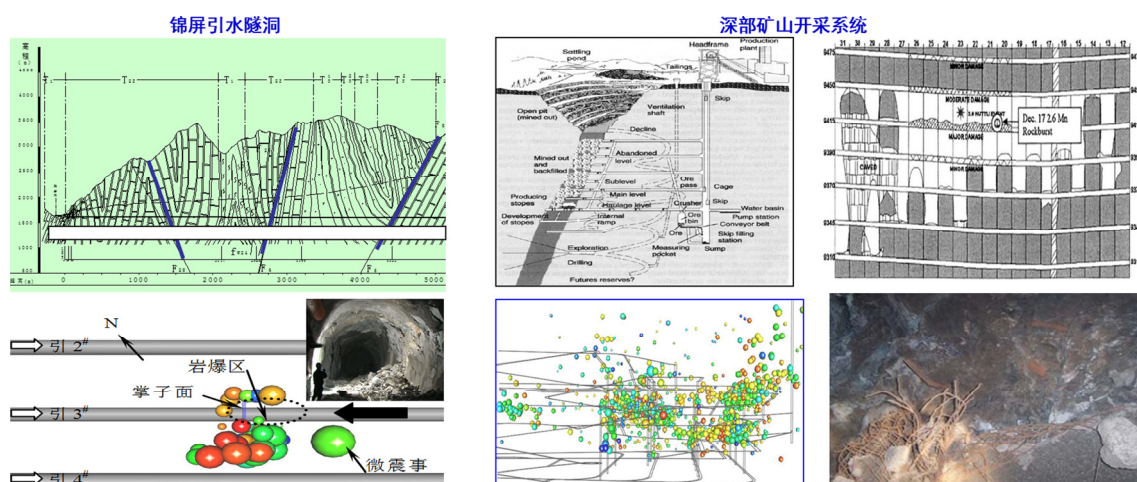


图8 水电工程与硬岩矿山微震监测系统对比示意图

Fig. 8 Contrast schematic diagram of microseismic monitoring system between hydropower project and hard rock mine

2.2 传统的空场法、崩落法过渡到充填法

传统的空场法、崩落法资源回收率低, 地表塌陷严重, 开采安全性差。随着国家对安全开采和资源回收的要求增大, 很多硬岩矿山已从传统的空场法、崩落法过渡到充填法, 并在过渡工艺和相应的充填方法、充填材料、充填浓度等方面进行了大量实践。为成功实现空场法、崩落法向充填法的变革, 至少需要突破四个方面的关键技术难点: 1) 过渡阶段的协同开采方法与技术; 2) 充填方法与工艺、充填材料和浓度等优化革新; 3) 生态环境和地下水资源监控; 4) 围岩和充填体稳定性监测。

在空场法、崩落法向充填法变革中, 我们也曾做了一些很有成效的工作, 代表性的实例有:

1) 开阳磷矿空场法改充填法的变革, 这也是我国首例实施充填法的化工矿山。我国最大的磷化工生产基地开磷集团, 优质磷资源占全国 45% 以上, 但因矿山长期沿用空场法和崩落法开采, 导致资源损失严重 (损失率 31.3%), 山体崩落、大量构筑物破坏、矿区交通被阻断。为此, 我们通过磷废料改性与全磷渣充填系统与方法的研究, 不但解决了当时磷废料大量产出 (>5000 万 t/a), 堆置占地, 粉尘污染与江河水系污染

严重, 再利用程度极低 (利用率 $<4\%$) 等问题, 而且大幅度提升了开磷集团资源回收率和生产能力。通过磷石膏改性和建立了国际上第一套超细全磷渣充填系统 (见图 9)^[11], 实现了全磷渣无废害充填^[32-33], 建成了世界第一例磷石膏废料作充填料的无废害开采矿山。

2) 赤峰山金红岭铅锌矿崩落法改充填法变革。该矿 2006 年建矿以来, 一直采用空场崩落联合采矿法, 造成严重的地表塌陷。截止 2018 年底, 塌陷坑体积达 210 万 m^3 , 生态环境破坏严重。随着向深部开采, 地压显现越来越严重, 采矿贫化损失难以控制。为此, 我们提出了通过隔离矿柱分离崩落法与开采的上部与下部矿体, 实现由空场崩落联合采矿法向分段空场嗣后充填采矿法转变 (见图 10)。通过分析崩落坑岩体陷落与充填料充填迁移规律^[34-35], 实现了崩落坑范围有效控制, 矿山也因此建设成为了国家级绿色矿山。

2.3 隐患破碎矿段实现安全高效开采

有色金属矿山的隐患破碎矿段泛指硬岩矿山特别是两步骤多阶段回采留下矿柱、无序开采采富弃贫所弃矿产、民采群采乱采滥挖所弃矿产等地下残留矿体。据初步统计, 这类资源占现有资源储量的 30%~35%,

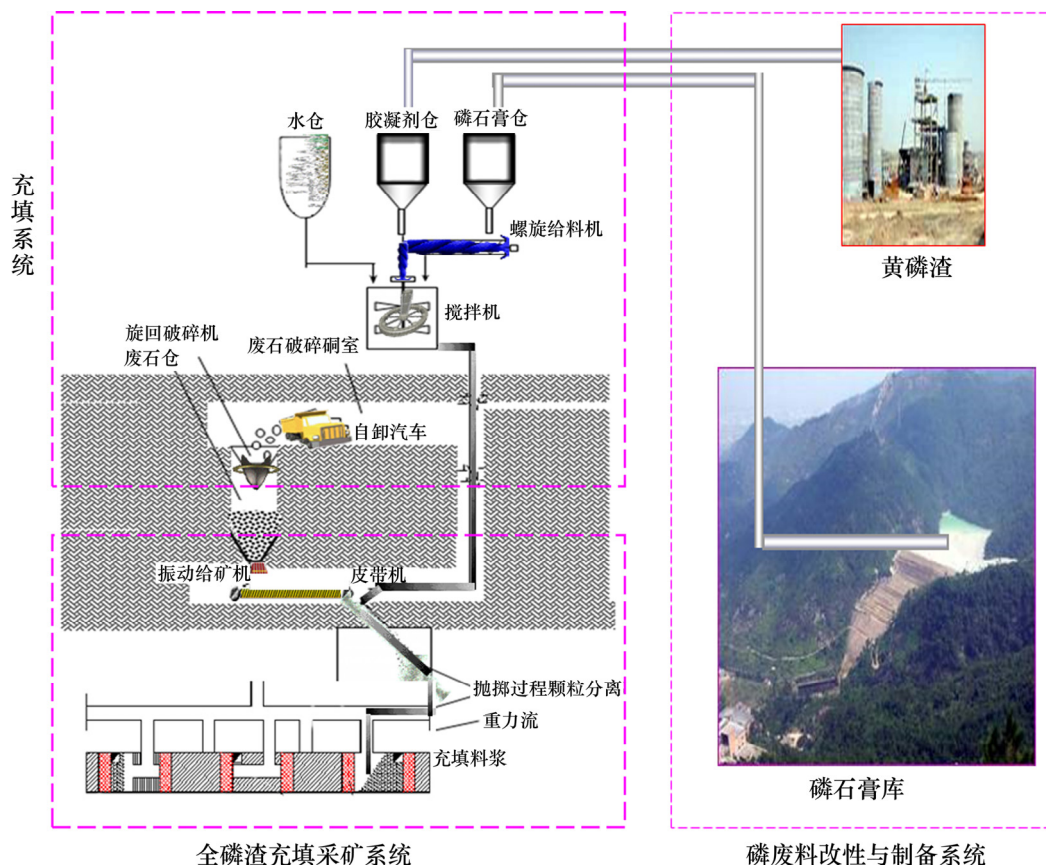


图 9 全磷废料充填方法与系统

Fig. 9 Backfilling method and system of total phosphorus waste

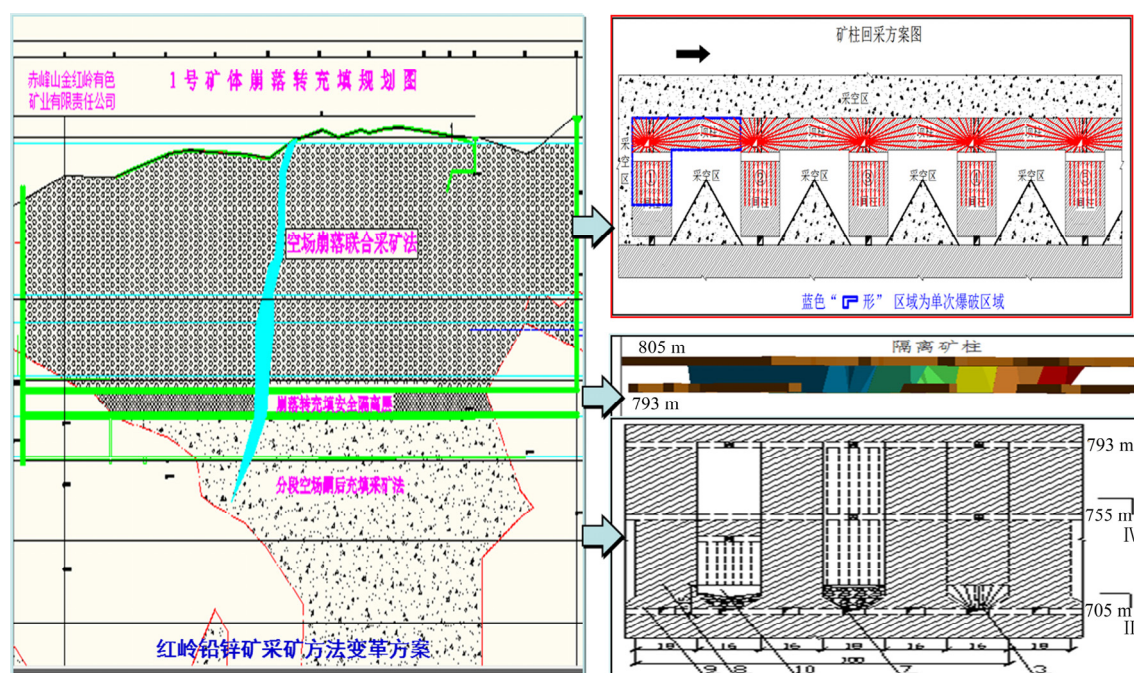


图 10 红岭铅锌矿分段空场嗣后充填采矿法

Fig. 10 Hongling lead-zinc mine sublevel open stope mining method with delay backfilling

且品位高,但这些隐患矿体多处于空区与充填体环境下,矿岩破碎,地压显现大,安全性极差,回收困难。要实现这类矿体的安全高效开采,至少必须突破以下技术难点:1)采空区的精确定位测量;2)安全高效的回收方法;3)空区与充填体的稳定。对此,我们在国内最早引进英国 MDL 公司的激光三维扫描系统 (CALS),开展了高天井爆破一次成井和实施地下大规模中深孔深孔爆破下的精准减震措施与方法^[36-39],这方面代表性的实例如下:

1) 复杂采空区环境下露天矿规模化安全开采。栾川钼矿被称为“中国钼都”,钼资源储量约占全球的 10%,全国 26%,矿区隐患资源高达 40%,矿山生产效率低,成本高,安全性极差,且资源损失严重(见图 11)。导致这些问题的主要原因是^[36-37]:矿区内存在大量的规模不等、空间重叠、形态各异的采空区;常规方法开采效率低,成本高,易导致人员伤亡、设备损毁。本文作者通过采空区探测与准确定位^[36]、临界隔离层厚度确定^[39]、深孔崩矿不间断采矿等手段,开发了隐患露天矿千万吨级规模化安全开采技术,实现了隐患矿体露天深孔崩矿不间断采矿(见图 12)。矿山生产能力也从不到 300 万 t 跃升到了 1000 万 t,成为了复杂空区环境下的露天规模化开采的示范矿山。

2) 充填体环境下的矿柱高效回收。新城金矿矿石品位中等偏高,平均品位为 3.5 g/t;矿体埋藏深,矿体倾角一般为 30°~40°,平均厚度为 59 m,走向长度

为 160~220 m。该矿一步矿房采用机械化上向分层充填法开采,二步矿房为充填体环境下的矿柱回收采场。我们通过大区域作业空间安全环境构建、大空间超限控制爆破实施、高天井一次爆破成井和大规模爆破安全控制等手段^[38-41],提出并实施了全分段预裂挤压一次爆破采矿法和预护顶中深孔凿岩嗣后分段充填法(见图 13),实现了矿柱安全高效回收。

3) 空区环境下的二步矿柱回收。太白金矿多年前广泛试验和推广应用分段凿岩阶段矿房法。该方法是将矿块划分为矿房和矿柱,第一步回收矿房,第二步回收矿柱。该矿上中段采用的采矿方法为有底柱阶段崩落法,并且矿柱的回收又缺乏充分的技术准备。为保证矿石不贫化,1200 m 中段实际上只回收了矿房,留下了大量顶底柱和间柱。我们通过中深孔落矿、微差减震等技术^[42],提出了水平扇形深孔阶段崩落法(见图 14),实现了矿柱安全高效回收,达到了预期效果。

2.4 大型水(海)下金属矿床实现安全高效低贫损开采

沿海岸辽阔的大陆架基岩内部赋存着丰富的矿产资源。在陆地浅部资源即将开采殆尽的今天,海底基岩矿体的开采,将成为我国矿产资源开发的重要对象。海底资源的开采必须要攻克以下几个技术难题^[43-44]:

1) 确定海底开采安全隔层厚度一为保证海底矿产安全开采,必须预留合适厚度的护顶矿体,护顶层太厚

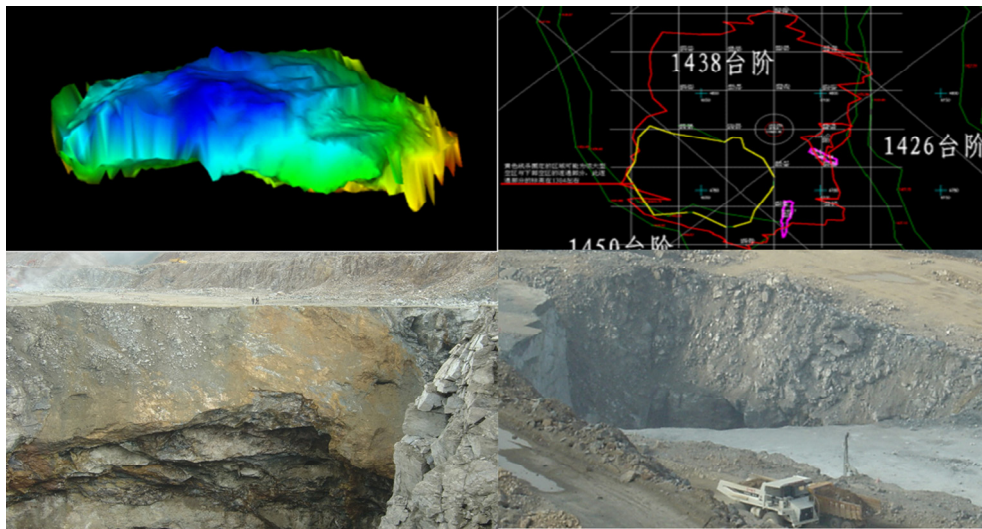


图 11 栾川钼矿大型空区实体模型

Fig. 11 Mining model for intelligent and continuous mining without explosives

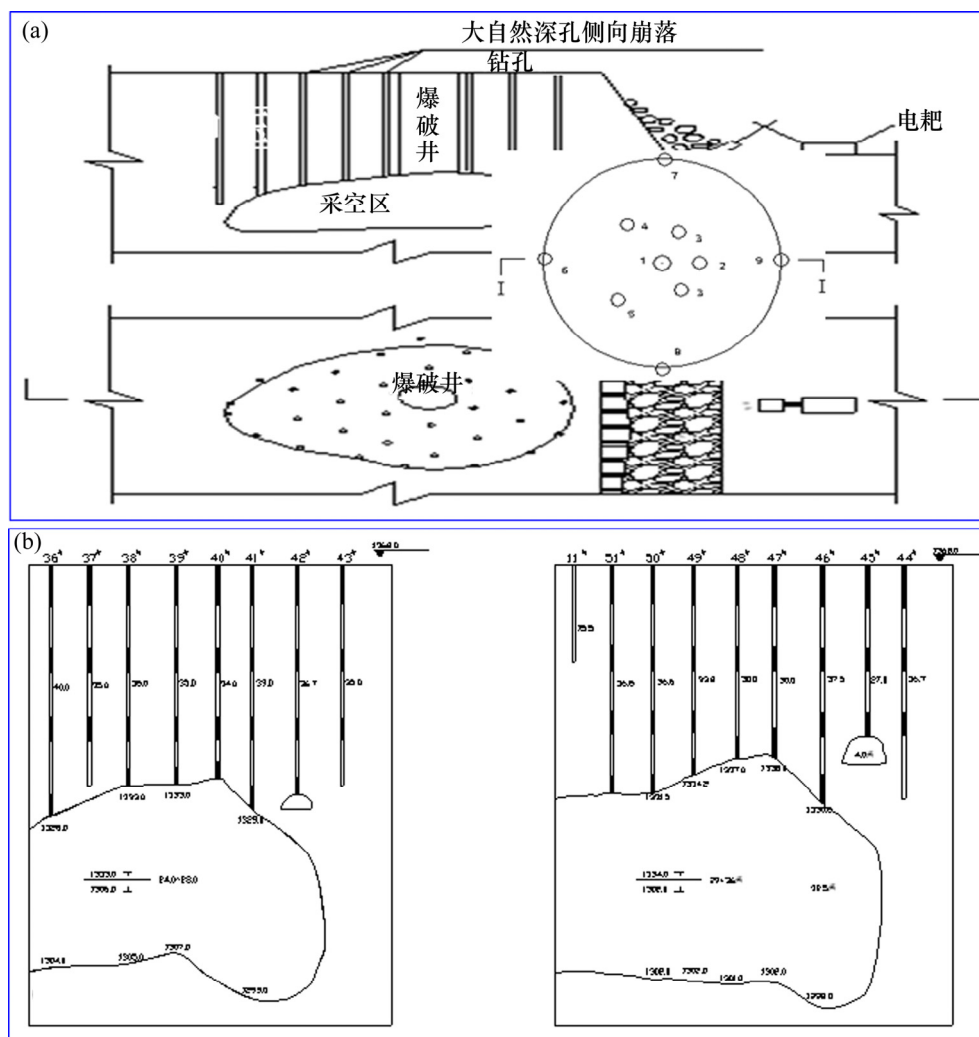


图 12 露天不间断规模开采示意图: (a) 大孔逆向爆破成井与侧向崩矿方法; (b) 地表垂直深孔分层爆破倒漏斗落矿法

Fig. 12 Schematic diagram of open-pit uninterrupted large-scale mining: (a) Large-hole reverse blasting induced shaft and lateral collapse method; (b) Vertical long hole multilevel blasting crater retreat stopping method

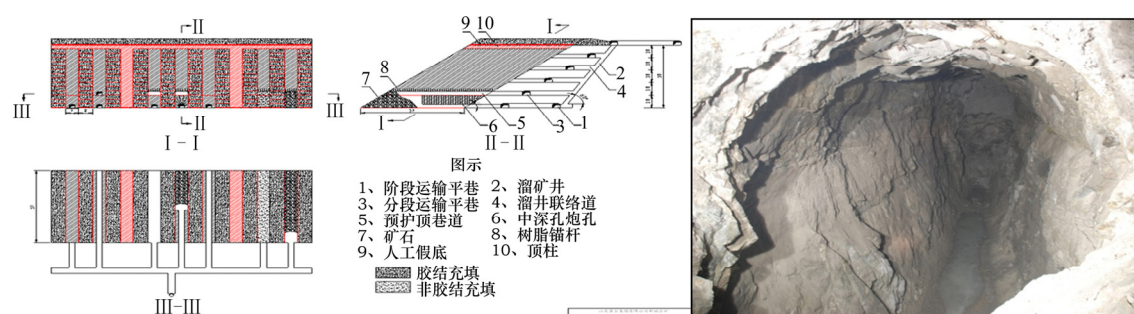


图 13 预护顶中深孔凿岩嗣后分段充填法

Fig. 13 Pre-protected roof for medium-length hole drilling and sublevel stopping with delayed filling

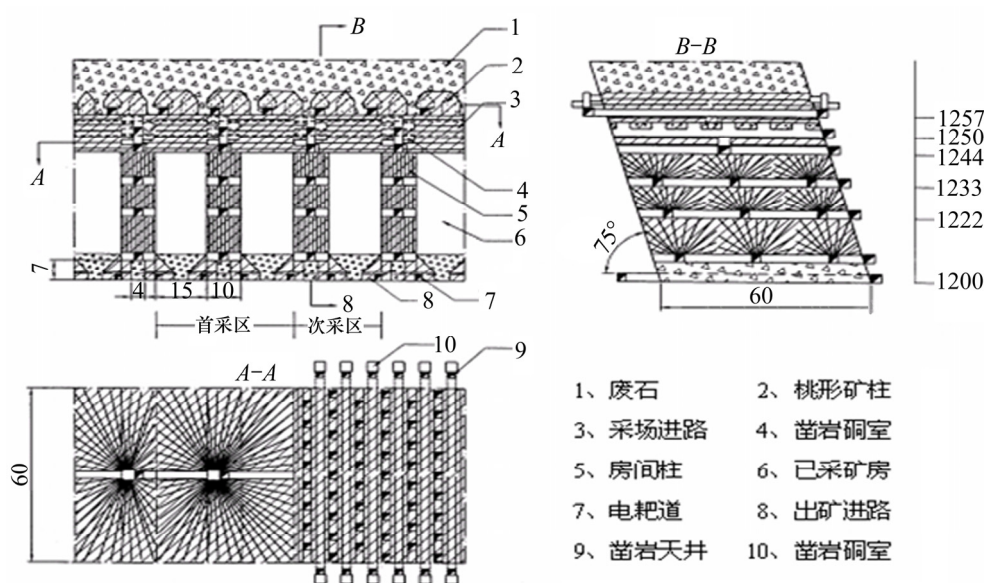


图 14 水平扇形深孔阶段崩落法回采矿柱

Fig. 14 Sublevel block caving method for mining pillar with horizontal ring long hole blasting design

会造成资源大量损失，护顶层太薄对采矿安全构成威胁；2) 开发低沉降安全高效开采技术—快速高强度海底采矿势必引起海床变形与沉降，必须研究与海底采矿相适应的低沉降高效采矿新工艺；3) 实现海底开采安全监测—海底开采环境复杂，极可能出现不均匀变形，必须布置合理的安全监测点，采用有效的安全监测技术。

为了攻克上述技术难题，我们开展了海底大型金属矿床高效开采与安全保障关键技术研究^[42, 45]。我们通过研发海底开采模拟试验平台，就合理的安全隔离层厚度、开采顺序与采矿方法等进行了深入研究，并进行了数值模拟与物理模拟的对比，开发了岩层微扰低沉降房柱式开采方法、絮状层解功能全尾充填与接顶方法和岩层变形与地下水观测系统，成功地在三山岛金矿建立了国内第一个大型海底基岩开采矿山，既

保证了海底开采的安全性，又满足了资源的高回收率要求(见图 15)。

2.5 智能化矿山构建已初见成效

硬岩矿山的智能化建设中，从矿山的数字建模到设备遥控、井下自动跟踪和生产管理决策支撑，在不同矿山均有成功的范例，但时至今日，硬岩矿山智能化进程仍发展不均衡且大多较为缓慢。智能化矿山的实现如图 16 所示，必须通过数字化建模软件、信息采集系统和光线环网以及人机交互系统和数据传输系统搭建三维可视化集成平台，实现设计智能化、监测可视化、设备自动化、生产系统无人化和管控一体化，从而达到资源与开采环境可视化、生产过程与设备智能化、生产信息与决策管理科学化^[8]。

贵州开阳磷矿率先在国内探索并初步实现了智能

化采矿,通过智能化规划与设计、井巷支护可视化 and 实时高精度地压预警实现了资源与开采环境可视化智能化,通过开采辅助系统无人化、充填系统自动化和设备自动化与远程操控实现了生产过程与设备无人化自动化,通过生产信息实时在线监测、井下人员设备精确定位、采掘生产物资管理和决策分析与反馈系统实现了生产信息与决策管理科学化^[8]。特别是我们为主完成的井巷支护可视化、实时高精度地压预警和充填系统自动化,为矿山生产过程的安全与智能化开采作出了关键贡献。

1) 基于数字矿山地质力学模型,通过岩体质量自动聚类分级,研发了矿山井巷支护标准化辅助决策系统,可实现不同工况条件下井巷及大硐室标准化支护方案的可视化设计与自动生成(见图 17)^[46]。

2) 在国际上最先提出了具有自主知识产权的无需预先测速微震定位方法,建立了矿山微震监测系统和三维可视化平台^[8](见图 18),能够实时感知岩层动力扰动信息并精确定位采场高应力分布位置,实现了高精度地压自动预警,确保了安全、高效、科学采矿^[47]。

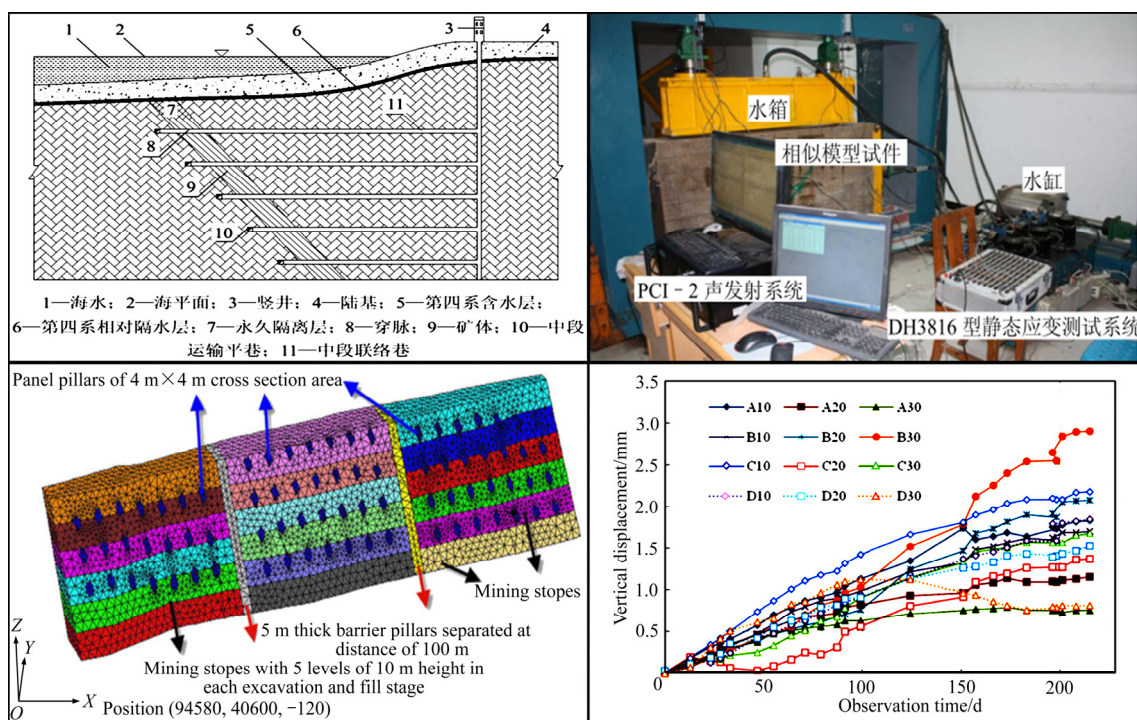


图 15 金属矿滨海基岩开采岩石力学理论与实践

Fig. 15 Theory and practice of rock mechanics related to exploitation of undersea metal mine

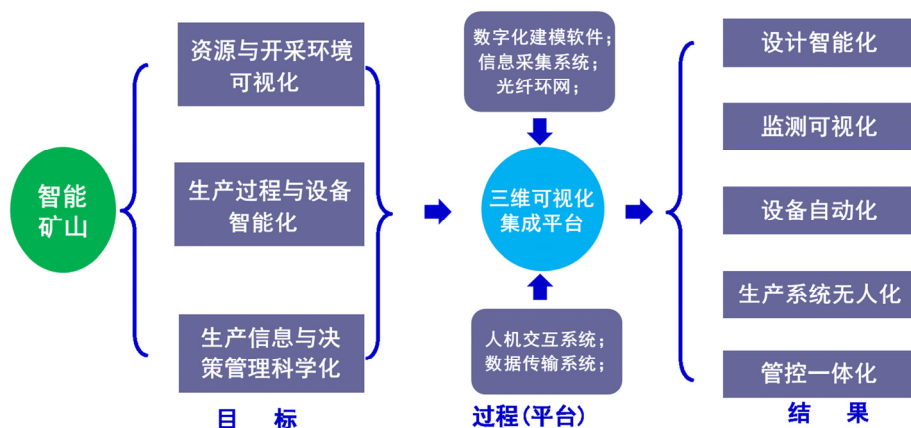


图 16 智能化矿山总体架构^[8]

Fig. 16 Technology system of intelligent mine^[8]

3) 建成了国际上首套全自动化远程控制超细全磷渣自胶凝充填系统, 成为全化工行业第一个实现无废开采的矿山(见图 19)。

2.6 深部硬岩开采理论与技术正稳步推进

我国矿山整体接近 1000 m, 且多为有色金属矿山。可以预见, 未来有色金属矿山将逐渐进入 1000~2000 m 深度的开采阶段。为此, 国家高度重视, 科技部专门设立重点研发专项“深地资源勘查开采”(国

科发资〔2016〕52 号)^[48], 并将深部矿产资源开采理论与技术作为该专项的指南方向, 就深部硬岩开采理论与技术问题展开研究。

鉴于硬岩矿山的开采深度和难度, 我们早在 2001 年就在国内最早成立了面向深部金属矿产资源开发与灾害控制的省部级重点实验室, 并就硬岩深部开采涉及的理论、技术与方法等问题展开了深入研究, 最早提出了基于能量调控与高应力诱导致裂的非爆连续开采方法, 并在 10 年前就在硬岩矿山开展这方面的工业

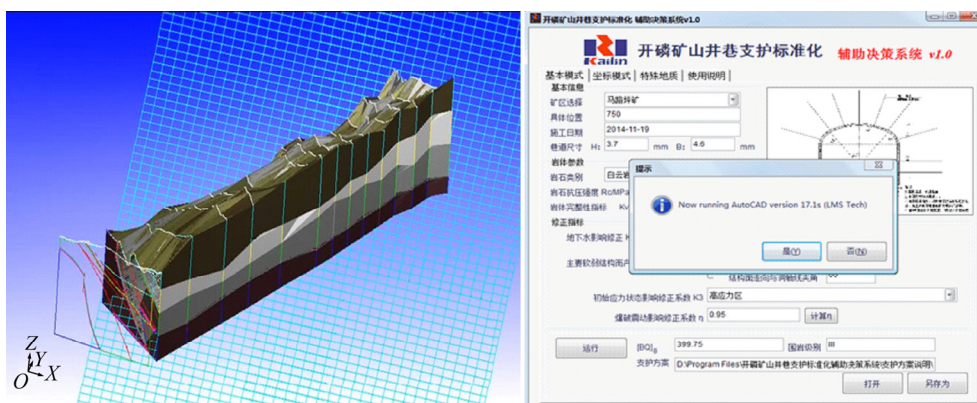


图 17 井巷支护标准化辅助决策系统

Fig. 17 Auxiliary decision system for support standardization of roadway

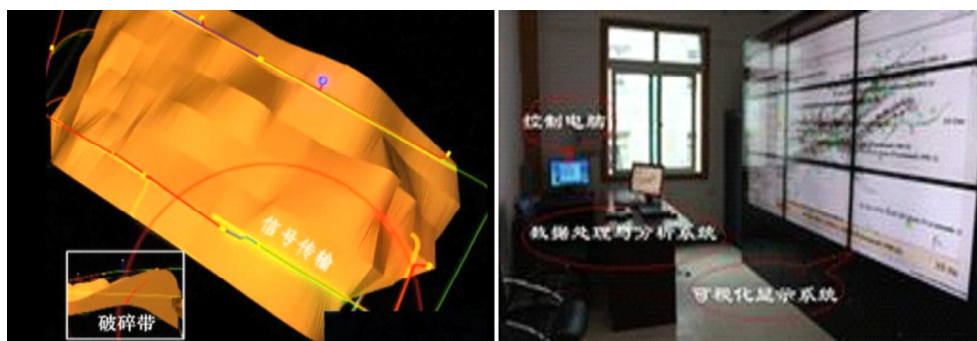


图 18 矿山微震监测系统和三维可视化平台

Fig. 18 Mining microseismic monitoring system and three-dimensional visualization platform

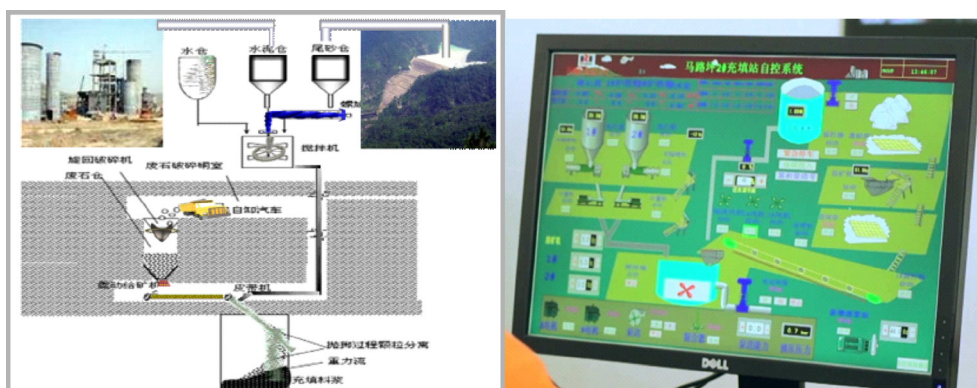


图 19 全自动化远程控制超细全磷渣自胶凝充填系统

Fig. 19 Automatic remote control of self-cementing filling system for ultra-fine total phosphorus slag

试验。针对深部硬岩开采受力特征,提出了深部开采有别于浅部的岩石动静组合加载理论,并用该理论很好地解释了深部硬岩开采诱发的非常规岩体灾害。最近,为构建适用非爆连续开采的开采深度随岩石强度等的变化判别式^[20],本文作者已在凡口铅锌矿、湘西金矿、开阳磷矿等典型矿山开展了不同深度松动区厚度及分布情况的实测与调查,试图揭示高应力对岩石破碎的贡献和诱导工程下高应力硬岩能量释放规律和破裂范围,为深部硬岩高应力诱导破碎非爆连续开采模式的实例提供试验依据。

3 硬岩开采技术前沿与展望

3.1 资源开采将向地球深部进军

目前,深海、极地和月球开采虽然也得到了很大的关注,但我们认为这只是国家的全球战略性考量,在相当长的一段时间内,固体资源开采特别是有色金属开采一定是向地球深部进军。

研究未来硬岩矿山开采,特别是有色金属矿开采理论与技术必须了解有色金属矿岩和开采的特点:1) 矿物含量(品位)极低,像金矿品位只有几克,且随着资源开采继续往下延深,大多数矿物品位会越来越低;2) 由于大多金属矿成因是热液型矿床,矿岩坚硬且应力、温度高;3) 硬岩矿山均采用凿岩爆破方法开采破碎岩石。

因此,未来硬岩矿山特别是有色金属矿山开采,必须以矿石提升量最小为目标,变革高应力、高温坚硬矿岩采矿方法,实现连续智能化无人开采。

3.2 变害为利的深部硬岩开采方法

早在2001年第175次香山会议上我们就提出了“变害为利”的深地资源安全高效开采的构思^[49],其主要思想如下^[2]:高应力、高地温、高井深是影响深

井开采及灾害控制的3大因素,高应力导致岩爆等灾害,高地温产生恶劣的工作环境,高深井导致矿石提升排水困难。以往将上述3个因素单纯视为灾害性因素而集中研究其如何控制,如岩爆机理与预测、热害抑制与缓解、提升系统优化等^[50-55]。事实上,高应力、高地温、高井深这三个灾害性因素有可被诱变成有利因素的可能性:高应力有利于坚硬矿岩致裂与块度控制;高地温可加速原地溶浸采矿过程中矿物与溶浸液间的相互作用,甚至利用地热供暖发电;高井深存在的高水压有利于高压水设备或井下动力源的更新(见图20)。

将深地灾害性因素诱变为有利因素的可能性付诸于实际必须要有具体的诱变方法和途径,对此我们也做了一系列的研究。

1) 高应力诱导致裂非爆机械化破岩。采矿进入深部后,会出现更多的岩体非常规破坏,比如岩爆、板裂、分区破裂等,其与深部高应力硬岩在开挖卸荷和动力扰动下岩体中的能量转移和释放密切相关,同时这些非常规破坏也是一个高能量岩体的自破裂过程,只要找到适当的诱导破裂方法,就可以将深部岩体的储存的能量和由此诱发的灾害性破坏诱变为岩石的有序破碎,在不用炸药或少用炸药的情况下实现深部矿床的安全高效开采(见图21)。

2) 高井深可提供高静水压力。高静水压力可用来驱动井下凿岩、采矿、装运等机械;致裂深部岩体,增加岩体渗透性;提升矿浆,使提升运输过程连续,并易于实现自动化、智能化和无人化作业(见图22)。

3) 高地温促进溶浸采矿和地热开发。一方面,高地温促进溶浸液与矿石相互作用,加速溶浸提取矿物,有利于原地溶浸采矿。另一方面,井下储存大量的地热能源,将热能送到地面,用于发电、供暖,通过地面的热交换又可实现井下工作面降温,促进热、电、资源联合开发,实现溶浸开采与地热资源的联合回收和真正意义上的绿色流态开采(见图23)。

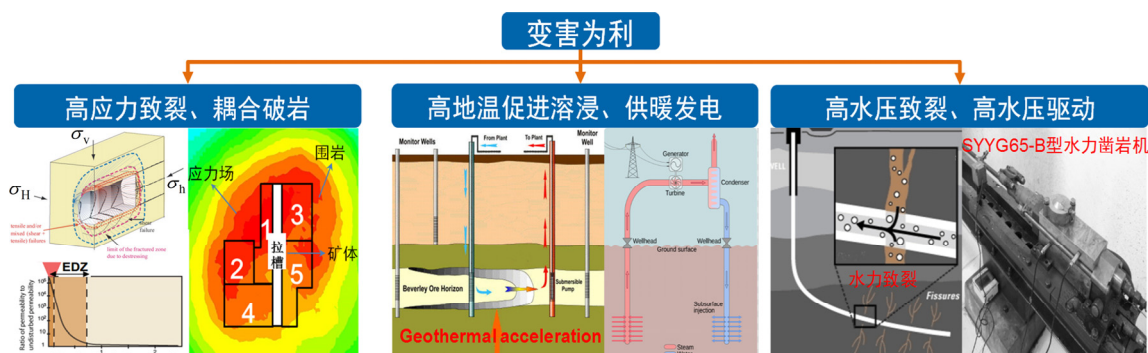


图20 深地资源灾害性因素变害为利途径

Fig. 20 Convert disastrous factors into benefits approaches in deep resources



图 21 高应力诱导致裂非爆机械化破岩

Fig. 21 Non-explosive mechanized rock breaking induced by high stress

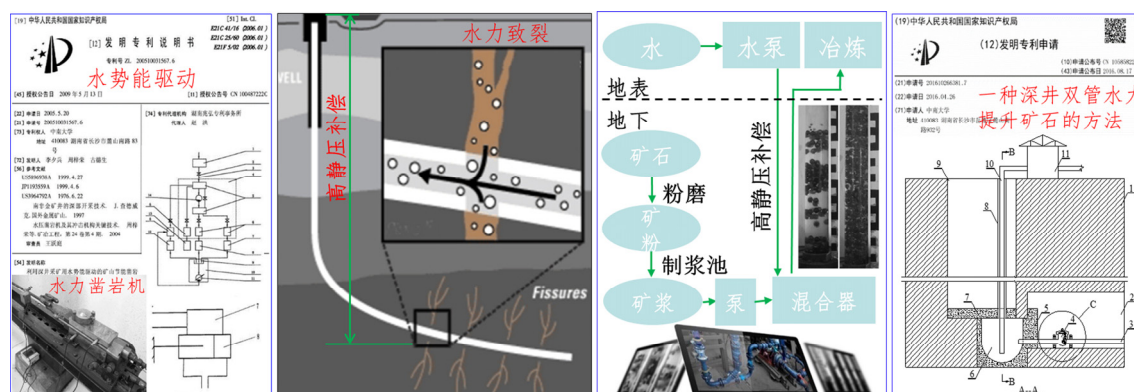


图 22 高井深提供高静水压力的有效利用

Fig. 22 Effective utilization of high hydrostatic pressure by great depth

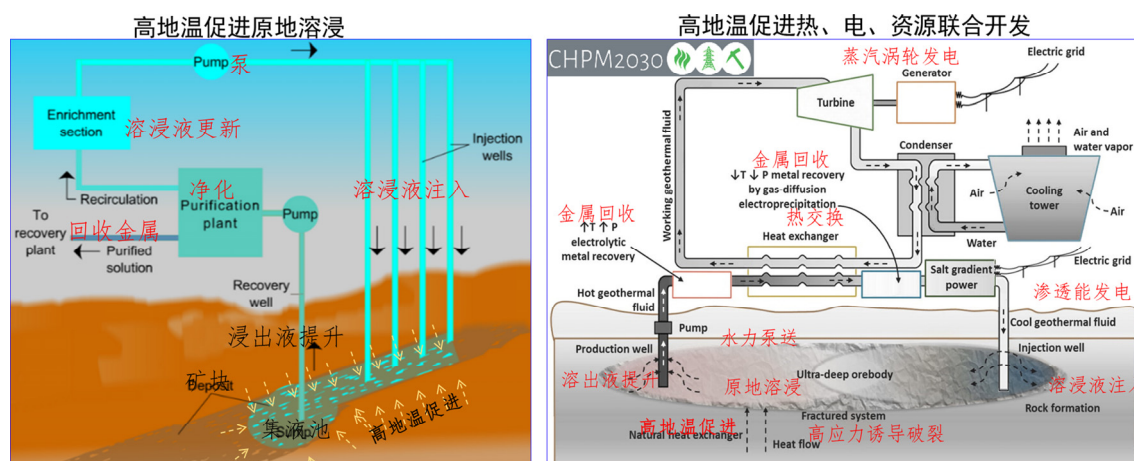


图 23 高地温促进溶浸采矿和地热开发

Fig. 23 High geo-temperature promoting solution mining and geothermal development

3.3 深地资源开采模式

深部硬岩矿山开采方法与技术必须随着开采深度的增加,依据矿岩在这些深度所处的环境及其新表现出的物质状态而发展变化。据此,本文作者曾提出了不同深度空间的地下采矿模式^[2]。在浅部,可采用常规的钻爆法破岩进行开采。随着地下开采进入深部高应力环境后,深部硬岩承受的高地应力意味着深部岩体贮存着高弹性能,可通过开挖诱导工程,将深部高地应力岩体弹性能诱变为用于岩体破碎的有用能,即通过诱导工程使高应力在开挖岩体周围形成损伤区后,再利用破岩机械等方法对损伤区进行截割落矿,继而实现高应力诱导机械化连续开采^[1]。继续向深部进发,对于有色金属特别是贵金属,由于矿石中有用物质的含量(品位)很低^[2],传统提升矿石的矿井提升方法将会因为提升有用矿物质以外的大量废石而消耗过多的能量,使其经济性极差,这时在井下配备破碎、选矿系统,对开采的矿石进行分选从而只提升矿精粉或者矿物质,抑或是制备成矿浆进行无间断水力提升,也可以利用深井高压对水力提升系统进行压力补偿从而节约提升耗能,不失为最为经济有效的办法。随着矿物质赋存深度的继续增加,由于高地温和高地压,井下作业环境将极为恶劣,以人和采矿机械为主导的采矿活动将无法进行。然而高地压、高地温以及水力提升技术可为深部溶浸采矿和热、电、矿物资源联合开发提供有利条件:比如可以利用高地压进行耦合致裂矿体,从而产生众多供溶浸液流通的导水裂隙;利用高地温不但促进溶浸液与矿物质的反应速度,而且高地温可通过溶浸液实现地热回收。当开采进入极深状态后,地温超过一定阈值,深地物质所处的状态将由脆性逐渐过渡为延性,并且物质状态逐渐由固态过

渡为流固混合态,常规开采技术难以进行,此时可以利用集采掘、液化、充填、水力提升于一体的集成化、智能化、无人化采矿舱对深地资源进行精准化、精细化无废开采。

3.4 深部开采理论突破

深部岩体灾害复杂多样,其发生机制缺乏科学解释,防控措施缺乏科学依据。为此,我们提出:“高初始静应力+强开采扰动”是深部岩体灾害的内在诱因和驱动机制^[50-51]。深部开采主要存在以下亟待解决的理论问题:1) 深部岩体应力环境及应力路径;2) 深部开采扰动形式的数学表征;3) 高应力与动力扰动作用下的岩石实验再现;4) 深部岩体非常规破坏机理;5) 深部高应力条件下动态破岩理论。

对此,本文作者从以下5个方面对深部开采理论进行了研究:1) 深部岩体内应力分布及变化特征;2) 开采扰动载荷的频域及时域特征;3) 真实模拟深部动静组合应力条件的实验方法及设备;4) 深部岩体非常规破坏的动静组合力学解释;5) 动静组合破岩机理及方法。特别是岩石动静组合加载理论既可指导深部岩体致裂与高效破岩,也可用于解释深部岩体灾害发生机制^[1,6,51-55],如图24所示。

3.5 深部开采技术突破

深部硬岩开采矿岩承受的高应力、高井深和高岩温导致工程实践中出现很多技术瓶颈,诸如深部环境时空特征感知力度不够;深部开采过程人工依赖性高,安全性差,效率低;开采工序复杂,决策管理人为因素影响严重,生产成本高等。对此必须通过地温、地应力智能监测、岩体不连续结构智能辨识、岩体三维波

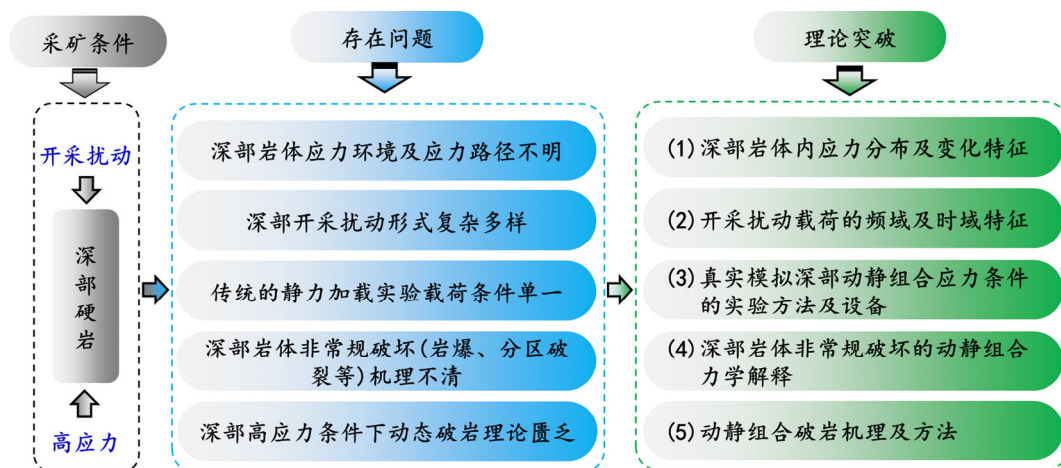


图24 深部开采理论瓶颈和突破

Fig. 24 Technology bottlenecks and breakthroughs in deep mining

速场层析反演和微震监测与岩体灾害智能预警^[56-58], 实现深部环境智能感知与灾害预警; 采用智能化连续采矿技术及装备、全断面智能化一次成井及开拓和“采护运选充”全过程智能化, 实现深部开采全过程智能控制; 构建生产信息实时监测及大数据库、生产全时空物联网及云计算、可视化集成及智能决策、深部开采管控一体化平台, 实现深部生产与决策智能管控。这一深部开采的相关技术和突破如图 25 所示。

3.6 深部开采实现智能化连续化的思考

深部开采实现智能化连续化在意识、制度、理论和技术等方面存在很多瓶颈和急需突破的技术难点, 如图 26 所示。具体归纳为 4 大瓶颈: 1) 意识瓶颈—

矿山生产全周期安全成本重视不够、人工成本低导致生产人工参与度高以及职业健康与环保成本一直被忽略; 2) 制度瓶颈—矿山企业社会责任重, 经济效益难提高, 且攻关项目管理分散评价机制不清晰; 3) 理论瓶颈—概念多真正的理论创新少, 岩体的非均匀性导致智能感知困难; 4) 技术瓶颈—高精尖制造技术对国外依赖性大、信息技术与人工智能技术起步晚和智能化采矿关键技术国产化程度低。

而针对这些问题, 必须有针对性地研讨相应的解决策略: 1) 意识突破—进行矿山生产全周期安全成本控制、切实以人为本加大人工资本投入和健全职业健康与环保评价及惩罚机制; 2) 制度突破—转化只是解决就业但负债运转的矿山, 并完善攻关项目管理制度

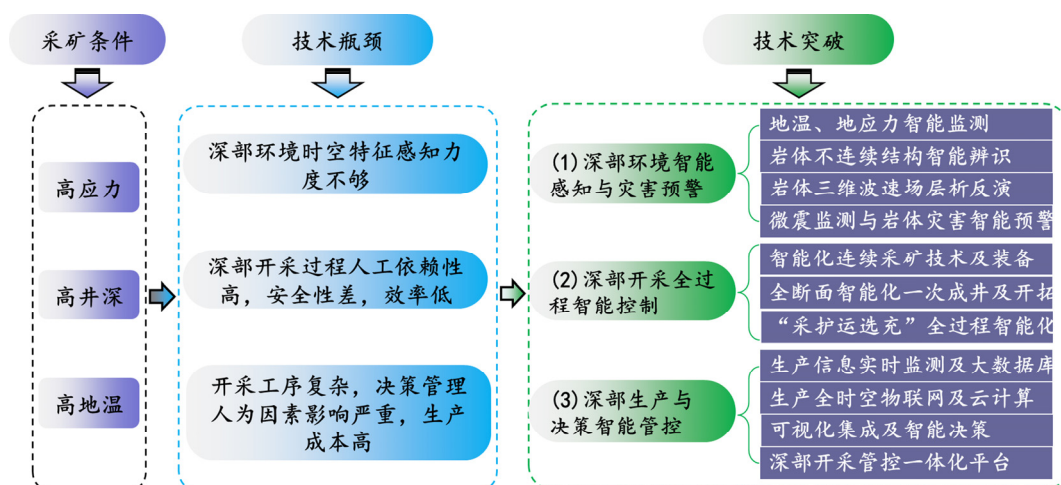


图 25 深部开采技术瓶颈和突破

Fig. 25 Technology bottlenecks and breakthroughs in deep mining

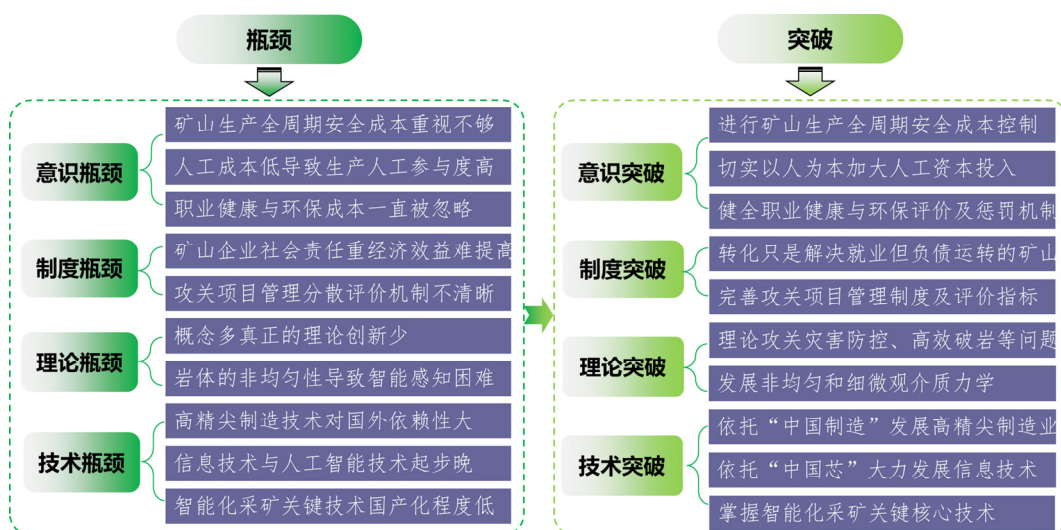


图 26 深部开采实现智能化连续化发展瓶颈及突破

Fig. 26 Bottleneck and breakthrough of intelligent continuous development in deep mining

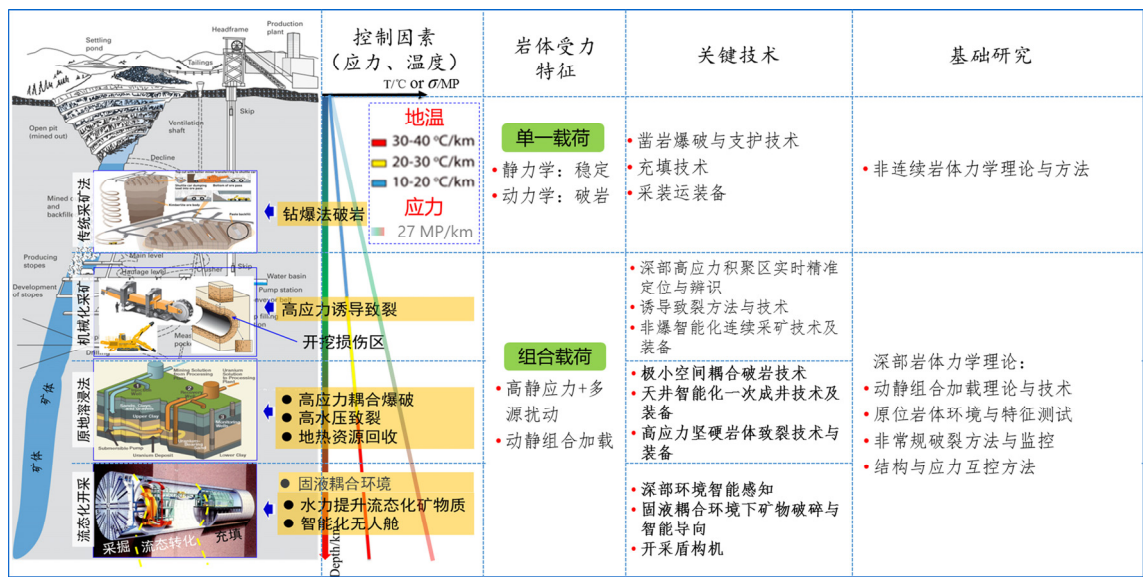


图 27 以坚硬矿岩高效破碎与开采诱发灾害有效控制为目标的深部金属矿开采模式

Fig. 27 Mining model of deep metal mines for high efficiency fragmentation of hard rock and effective control of disasters induced by mining

及评价指标; 3) 理论突破—理论攻关灾害防控、高效破岩等问题, 并发展非均匀和细微观介质力学; 4) 制度突破—依托“中国制造”发展高精尖制造业, 依托“中国芯”大力发展信息技术和掌握智能化采矿核心技术。

4 结语

本文作者以国内外硬岩矿山特别是有色金属矿山开采现状及研究成果为基础, 综述了近年来硬岩矿山开采方法与技术的发展历程和主要进展, 并指出我国硬岩矿山特别是有色金属矿山将会以深部资源为开发重点, 其相应理论与技术也将随开采深度发生变化, 如图 27 所示。

针对深部岩体典型的“三高”赋存环境的本真属性及资源开采“强扰动”“强时效”的附加属性, 导致深部高能级、大体量的工程灾害频发, 机理不清, 难以预测和有效控制的难题, 亟需发展考虑深部原位状态和开采扰动的深部岩体力学新理论、新方法, 破解深部资源开采的理论与技术难题。构建以矿石提升量最小、硬岩高效破碎和岩体非常规灾害有效控制为目标的深部硬岩矿山智能化连续开采模式, 将是硬岩矿山理论与工程界在相当一段时间里要努力追求的目标。

REFERENCES

[1] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

LI Xi-bing. Rock dynamics fundamentals and applications[M]. Beijing: Science Press, 2014.

[2] 李夕兵, 周健, 王少锋, 刘冰. 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.

LI Xi-bing, ZHOU Jian, WANG Shao-feng, LIU Bing. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6): 1236-1262.

[3] 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.

LI Xi-bing, YAO Jin-rui, GONG Feng-qiang. Dynamic problems in deep exploitation of hard rock metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2552-2562.

[4] ZHOU J, LI E, YANG S, WANG M, SHI X, YAO S, MITRI H S. Slope stability prediction for circular mode failure using gradient boosting machine approach based on an updated database of case histories[J]. Safety Science, 2019, 118: 505-518.

[5] 王运敏. 金属矿采矿工业面临的机遇和挑战及技术对策[J]. 现代矿业, 2011(1): 1-4.

- WANG Yun-min. Opportunities and challenges to metal mine mining industry and the technical countermeasures[J]. *Morden Mining*, 2011(1): 1–4.
- [6] ZHOU J, LI X B, MITRI H S. Evaluation method of rockburst: State-of-the-art literature review[J]. *Tunn Undergr Space Technol*, 2018, 81: 632–659.
- [7] 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.
- GU De-sheng, LI Xi-bing. Modern mining science and technology for metal mineral resources[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [8] 李夕兵, 曹芝维, 周 健, 等. 硬岩矿山开采方式变革与智能化绿色矿山构建——以开阳磷矿为例[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(10) (In press).
- LI Xi-bing, Cao Zhi-wei, ZHOU Jian, et al. Innovation of mining models and construction of intelligent green mine in hard rock mine: In Kaiyang Phosphate Mine as an example[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(10) (In press).
- [9] ZHOU J, LI X B, MITRI H S. Comparative performance of six supervised learning methods for the development of models of hard rock pillar stability prediction[J]. *Nat Hazards*, 2015, 79: 291–316.
- [10] 李夕兵, 刘 冰. 硬岩矿山充填开采现状评述与探索[J]. *黄金科学技术*, 2018, 26(4): 492–502.
- LI Xi-bing, LIU Bing. Review and exploration of current situation of backfill mining in hard rock mines[J]. *Gold Science and Technology*, 2018, 26(4): 492–502.
- [11] 李夕兵, 刘 冰, 姚金蕊, 石 英, 李地元, 杜绍伦, 何忠国, 高 栗, 王新民, 赵国彦, 刘志祥. 全磷废料绿色充填理论与实践[J]. *中国有色金属学报*, 2018, 28(9): 141–161.
- LI Xi-bing, LIU Bing, YAO Jin-rui, SHI Ying, LI Di-yuan, DU Shao-lun, HE Zhong-guo, GAO Li, WANG Xin-min, ZHAO Guo-yan, LIU Zhi-xiang, LI Qi-yue. Theory and practice of green mine backfill with whole phosphate waste[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(9): 141–161.
- [12] BENZAAZOUA M, FALL M, BELEM T. A contribution to understanding the hardening process of cemented paste fill[J]. *Minerals Engineering*, 2004, 17(2): 141–152.
- [13] SIVAKUGAN N, VEENSTRA R, NAGULESWARAN N. Underground mine backfilling in Australia using paste fills and hydraulic fills[J]. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2015, 1(2): 1–7.
- [14] 王新民, 肖卫国, 张钦礼. 深井矿山充填理论与技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
- WANG Xin-min, XIAO Wei-guo, ZHANG Qin-li. Theory and technology of deep mine backfilling[M]. Changsha: Central South University Press, 2005.
- [15] 古德生, 邓 建, 李夕兵. 地下金属矿山无间柱连续采矿可靠性分析与设计[J]. *中国工程科学*, 2001, 3(1): 51–57.
- GU De-sheng, DENG Jian, LI Xi-bing. Reliability analysis and design of non-pillar continuous mining in underground metal mines[J]. *Engineering Science*, 2001, 3(1): 51–57.
- [16] SPACHTHOLZ F X. Non-explosive mining systems for hard rock mines[EB/OL]. <http://www2.tu-berlin.de/~bg/projects/rip-e.htm>. 1996.
- [17] SPACHTHOLZ F X. Operational conditions for continuous mining systems in hard rock open pit[EB/OL]. <http://www2.tu-berlin.de/~bg/projects/fraes-e.htm>. 1996.
- [18] SINGH S P. Non-explosive applications of the PCF concept for underground excavation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technol*, 1998, 13(3): 305–311.
- [19] LI X B, ZHAO F J, FENG T, DENG X M. A multifunctional testing device for rock fragmentation by combining cut with impact[J]. *Tunnelling and Underground Space Tech*, 2004, 19: 526–528.
- [20] WANG S, LI X, YAO J, GONG F, LI X, DU K, TAO M, HUANG L, DU S. Experimental investigation of rock breakage by a conical pick and its application to non-explosive mechanized mining in deep hard rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 122: 104063.
- [21] 李夕兵, 姚金蕊, 杜 坤. 高地应力硬岩矿山诱导致裂非爆连续开采初探——以开阳磷矿为例[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(6): 1101–1111.
- LI Xi-bing, YAO Jin-rui, DU Kun. Preliminary study for induced fracture and non-explosive continuous mining in high-geostress hard rock mine —— A case study of Kaiyang phosphate mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(6): 1101–1111.
- [22] YAO J R, MA C D, LI X B, YANG J L. Numerical simulation of optimum mining design for high stress hard-rock deposit based on inducing fracturing mechanism[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(9): 2241–2247.
- [23] URONEN P, MATIKAINEN R. The intelligent mine[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 1995, 28(17): 9–19.
- [24] BAIDEN G R. Telemining systems applied to hard rock

- metal mining at Inco limited. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*[M]. Littleton: Society of Mining, Metallurgy and Exploration, 2001: 671–679.
- [25] SEPPANEN P. Intellimine research and development[J]. *World Mining Equipment*, 1993, 11: 15–16.
- [26] SCOBLE M. Progress of Canada mine automation: From digital mine to full mine automation[J]. *CIM Bulletin*, 1995(5): 30–36.
- [27] HOLMAN D W, MCPHERSON M J, LOOMIS I M. *Underground thin-seam coal mining in Virginia*[M]. Virginia Center for Coal and Energy Research, 1999.
- [28] Rio Tinto aims for “intelligent” Australian iron ore mine – by James Regans (Reuters U.S.-December 4, 2017)[EB/OL]. <https://republicofmining.com/2017/12/06/rio-tinto-aims-for-intelligent-australian-iron-ore-mine-by-james-regans-reuters-u-s-december-4-2017/>
- [29] 李夕兵, 陈江湛, 马春德, 刘泽霖. 地质岩芯空间姿态复原装置. 中国, CN 201910355119.3[P]. 2019–08–02.
- LI Xi-bing, CHEN Jiang-zhan, MA Chun-de, LIU Zei-lin. Recovery device for spatial layout of geological core. China, CN 201910355119.3 [P]. 2019–08–02.
- [30] 马春德, 刘泽霖, 龙珊, 郭春志, 周亚楠. 一种孔内岩芯空间方向定位装置及套孔应力解除法验证法. 中国, 201810954917.3[P]. 2018–12–18.
- MA Chun-de, LIU Zei-lin, LONG Shan, GUO Chun-zhi, ZHOU Ya-nan. A spatial orientation positioning device for core in borehole and verification method of stress release method by overcoring. China, 201810954917.3[P]. 2018–12–18.
- [31] LI X B, DONG L J. Comparison of two methods in acoustic emission source location using four sensors without measuring sonic speed[J]. *Sensor Letters*, 2011, 9(5): 1501–1505.
- [32] LI X, DU J, GAO L, HE S, GAN L, SUN C, SHI Y. Immobilization of phosphogypsum for cemented paste backfill and its environmental effect[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 156: 137–146.
- [33] SHI Y, GAN L, LI X, HE S, SUN C, GAO L. Dynamics of metals in backfill of a phosphate mine of Guiyang, China using a three-step sequential extraction technique[J]. *Chemosphere*, 2018, 192: 354–361.
- [34] 李夕兵, 彭定潇, 冯帆, 李小松. 基于中厚板理论的深部崩落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.
- LI Xi-bing, PENG Ding-xiao, FENG Fan, LI Xiao-song. Stability analysis of horizontal insulating pillar in deep mining from caving to filling method on the basis of refined plate theory[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(3): 484–494..
- [35] LI C J, LI X B. Influence of wavelength-to-tunnel-diameter ratio on dynamic response of underground tunnels subjected to blasting loads[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 112: 323–338.
- [36] 刘科伟, 李夕兵, 宫凤强, 刘希灵, 王卫华. 基于 CALS 及 Surpac-FLAC^{3D} 耦合技术的复杂空区稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(9): 1924–1931.
- LIU Ke-wei, LI Xi-bing, GONG Feng-qiang, LIU Xi-ling, WANG Wei-hua. Stability analysis of complicated cavity based on CALS and coupled surpac-FLAC^{3D} technology[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(9): 1924–1931.
- [37] LIU K W, LI X, HAO H, LI X B, SHA Y, WANG W, LIU X. Study on the raising technique using one blast based on the combination of long-hole presplitting and vertical crater retreat multiple-deck shots[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 113: 41–58.
- [38] LIU K W, YANG J, LI X B, HAO H, LI Q, LIU Z, WANG C. Study on the long-hole raising technique using one blast based on vertical crater retreat multiple deck shots[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 109: 52–67.
- [39] LIU K W, HAO H, LI X B. Numerical analysis of the stability of abandoned cavities in bench blasting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 92: 30–39.
- [40] LI Q Y, LIU K, LI X B, WANG Z W, WENG L. Cutting parameter optimization for one-step shaft excavation technique based on parallel cutting method[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, 28(7): 1413–1423.
- [41] LIU K, LI Q, WU C, LI X, LI J. 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, 109: 91–104.
- [42] 李夕兵, 凌同华, 张义平. 爆破震动信号分析理论与技术[M]. 科学出版社, 2009.
- LI Xi-bing, LING Tong-hua, ZHANG Yi-ping. Analysis of blast vibration signals theories and methods[M]. Beijing: Science Press, 2009.

- [43] 李夕兵, 刘志祥, 彭康, 赵国彦, 彭述权. 金属矿滨海基岩开采岩石力学理论与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1945–1953.
- LI Xi-bing, LIU Zhi-xiang, PENG Kang, ZHAO Guo-yan, PENG Shu-quan. Theory and practice of rock mechanics related to the exploitation of under seametal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1945–1953.
- [44] 陈玉民, 李夕兵. 海底大型金属矿床安全高效开采技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
- CHEN Yu-min, LI Xi-bing. Research on technology of efficient and safe mining in large-undersea metal deposit[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.
- [45] LI X, LI D, LIU Z, ZHAO G, WANG W. Determination of the minimum thickness of crown pillar for safe exploitation of a subsea gold mine based on numerical modelling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 57: 42–56.
- [46] 马春德. 开磷矿山井巷支护标准化辅助决策系统[CP]. 登记号 2014SR018750, 2014.
- MA Chun-de. Auxiliary decision-making system for standardization of mine and tunnel support in Kaiyang phosphate mine[CP]. Registration No. 2014SR018750, 2014.
- [47] 李夕兵, 董陇军, 黄麟淇, 王泽伟, 尚雪义. 实时高精度多维微震监测系统[CP]. 登记号 2016SR143850, 2016.
- LI Xi-bing, DONG Long-jun, HUANG Lin-qi, WANG Ze-wei, SHANG Xue-yi. Real-time high-precision multi-dimensional microseismic monitoring system[CP]. Registration No. 2016SR143850, 2016.
- [48] 樊俊, 郭源阳, 董树文. DREAM—国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项解析[J]. 有色金属工程, 2018, 8(3): 1–6.
- FAN Jun, GUO Yuan-yang, DONG Shu-wen. Analysis on DREAM—Deep Resources Exploration and Mining, a Special Project in the Framework of National Key R&D Program of China[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2018, 8(3): 1–6.
- [49] 李夕兵, 古德生. 深井坚硬矿岩开采中高应力的灾害控制与破碎诱变[C]//香山第175次科学会议. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 101–108.
- LI Xi-bing, GU De-sheng. The hazard control and cataclastic mutagenesis induced by high stress in hard rock mining at depth[C]//The 175th Xiangshan Science Congress. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 101–108.
- [50] 李夕兵, 宫凤强, 王少锋, 李地元, 陶明, 周健, 黄麟淇, 马春德, 杜坤, 冯帆. 深部硬岩矿山岩爆的动静组合加载力学机制与动力判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 708–723.
- LI Xi-bing, GONG Feng-qiang, WANG Shao-feng, LI Di-yuan, TAO Ming, ZHOU Jian, HUANG Lin-qi, MA Chun-de, DU Kun, FENG Fan. Coupled static-dynamic loading mechanical mechanism and dynamic criterion of rock burst in deep hard rock mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 708–723.
- [51] LI X, GONG F, TAO M, DONG L, DU K, MA C, ZHOU Z, YIN T. 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.
- [52] WANG M, SHI X, ZHOU J. Charge design scheme optimization for ring blasting based on the developed Scaled Heelan model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 110: 199–209.
- [53] ZHOU J, LI X B, MITRI H S. Classification of rockburst in underground projects: Comparison of ten supervised learning methods [J]. J Comput Civ Eng, 2016, 30(5): 04016003.
- [54] LI X B, ZHOU Z L, LOK T S, HONG L, YIN T B. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5): 739–748.
- [55] DU K, TAO M, LI X B, ZHOU J. Experimental study of slabbing and rock burst induced by true-triaxial unloading and local dynamic disturbance[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(9): 3437–3453.
- [56] LI X, SHANG X, MORALES-ESTEBAN A, WANG Z. Identifying P phase arrival of weak events: The Akaike Information Criterion picking application based on the Empirical Mode Decomposition[J]. Computers & Geosciences, 2017, 100: 57–66.
- [57] WANG Z, LI X, ZHAO D, SHANG X, DONG L. Time-lapse seismic tomography of an underground mining zone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 107: 136–149.
- [58] HUANG L, LI J, HAO H, LI X. Micro-seismic event detection and location in underground mines by using Convolutional Neural Networks (CNN) and deep learning[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81: 265–276.

Review and prospect of mining technology in hard rock mines

LI Xi-bing^{1,2}, HUANG Lin-qi^{1,2}, ZHOU Jian^{1,2}, WANG Shao-feng^{1,2}, MA Chun-de^{1,2},
CHEN Jiang-zhan^{1,2}, LIU Zhi-xiang^{1,2}, LI Qi-yue^{1,2}, ZHAO Guo-yan^{1,2}

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Resources Exploitation and Hazard Control for Deep Metal Mines,
Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Based on the present situation and research results of hard rock mines at home and abroad, especially non-ferrous metal mines, the development history and main progress of mining methods and technologies were summarized in recent years. With the advancement of technology and the improvement of safety environmental protection requirements, it's observed that in-situ stress detection and pressure monitoring technology are more accurate and reliable, and the traditional open stope method and block caving method are transited to backfilling method, a new safe and efficient mining method is realized in fractured mining section with hidden hazards, and a safe, efficient and low-dilution mining method has been achieved in large-scale metal deposits underwater. Moreover, the construction of intelligent mines has achieved initial results, and the theory and technology of deep hard rock mining are steadily advancing. At the same time, guided by the technological revolution of hard rock mines and with an aim to solve the bottleneck difficulties of deep solid resource mining, the conception of deep mining method of "Convert harm into benefit" was presented systematically, and the scientific and technological conception of different mining modes for deep resources with different depths, especially for non-ferrous precious mineral resources, as well as some key points of theoretical difficulties, technical bottlenecks and breakthrough directions in deep mining were also addressed, which will provide theoretical and technical reference for resource mining to march deep into the earth.

Key words: hard rock mine; non-ferrous metal mine; deep mining method; mining technology; non-explosive continuous mining; converting harm into benefit

Foundation item: Project(41630642) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(51927808) supported by the National Major Research and Development Projects of Scientific Instruments, China

Received date: 2019-07-10; **Accepted date:** 2019-09-12

Corresponding author: LI Xi-bing; Tel: +86-13974870961; E-mail: xbli@csu.edu.cn

(编辑 李艳红)