



# 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

李夕兵<sup>1,2</sup>, 曹芝维<sup>1,2</sup>, 周健<sup>1,2</sup>, 黄麟洪<sup>1,2</sup>, 王少锋<sup>1,2</sup>, 姚金蕊<sup>3</sup>, 何忠国<sup>3</sup>,  
马春德<sup>1,2</sup>, 董陇军<sup>1,2</sup>, 赵国彦<sup>1,2</sup>

(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;

3. 贵州开磷(集团)有限责任公司, 贵阳 550300)

**摘要:** 在阐述矿山开采模式历程、非爆连续开采和智能化开采现状的基础上, 探讨硬岩矿山开采方法变革与智能化矿山构建。基于深部开采矿岩受力特征、秉承“变害为利”的思想, 构建了深地资源安全高效开采发展框架和矿山循环经济模式, 并以开阳磷矿为例, 初步实践了矿山深部硬岩开挖与灾害控制互换的非爆连续开采与资源开采无害化循环利用新模式; 构建和完善了智能化矿山理论框架和方法体系, 在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的基础上, 借助数字化建模软件、信息采集系统、光纤环网, 人机交互系统和数据传输系统等, 架构了开阳磷矿三维可视化集成平台, 实现了设计智能化、监测可视化、设备自动化、生产系统无人化和管控一体化, 为深部固体资源安全高效智能化开采与循环利用实践提供参考。

**关键词:** 硬岩矿山; 非爆连续开采; 循环经济; 智能化矿山; 开阳磷矿

文章编号: 1004-0609(2019)-10-2364-17

中图分类号: TU45

文献标志码: A

在硬岩开采实践中, 主导硬岩(金属矿)回采的传统凿岩爆破方法日益暴露出自身的缺陷, 与现代工业所要求的安全、环保(卫生)、高效原则相悖, 弊端主要表现在<sup>[1-5]</sup>: 作业危险、生产效率低、能量利用率低且衍生破坏大。一些国家相继启动了以探索硬岩矿山非爆采矿方法为目标的科研项目<sup>[6-9]</sup>, 试图找到一种取代传统爆破的高效破岩方法。先后涌现出许多新型破岩方法, 如掘进机破岩、高压水射流破岩、化学膨胀剂破岩、热力破岩、微波破岩、电磁破岩、激光破岩等。然而大部分侧重从克服金属矿硬岩的高硬度和高磨蚀性出发, 依赖外部能量进行矿岩致裂和破碎。这些非爆破岩方法和技术虽都已经达到应用程度, 但多用于巷道掘进或二次破岩, 不适用于大规模采矿, 而且这些新技术的设备造价和使用费用都比较高, 相对目前采矿成本来讲仍十分高昂。早在 2001 年的深部开采香山科学会议上, 李夕兵等<sup>[10-11]</sup>就提出: 深部高应力硬岩实际是个能量的储存体, 在深部工程中“爆破诱发岩爆”及“岩石好凿好爆”等现象都是高应力硬岩在动力扰动下的结果, 深部高应力硬岩存在着更利

于岩石破碎的倾向, 只要找到适当的诱导破裂方法和途径, 其内部储能就会变成有效破岩的有用动力源, 在不用炸药或少用炸药的情况下实现深部矿床的高效连续开采, 即高应力硬岩的非爆连续开采<sup>[12-13]</sup>。为此, 本文作者在大量实验室实验、机理分析和工程实践的基础上, 提出了高应力硬岩诱导致裂的思想, 通过布置人工诱导工程, 成功实现了高应力硬岩的高效连续落矿<sup>[14]</sup>, 通过大量研究与现场试验, 本文作者深刻认识并坚信: 利用深部硬岩矿山的高应力储能, 通过合适的诱导工程, 深部硬岩非爆连续开采是可望实现的。

矿山的粗放式开采带来了强污染和大量的“三废排放”, 使矿山及周围地区的生态地质环境日益恶化, 严重制约了矿业经济的可持续发展, 如何在采矿过程中全面实现资源的循环利用与“零排放”, 在强调绿水青山也是金山银山的今天显得特别重要。同时“智慧地球”理念促生了智能采矿、感知矿山、智慧矿山等概念<sup>[15]</sup>。智能矿山(Intelligent mine)的雏形可回溯至 1992 年芬兰提出的智能矿山(Intellimine)计划, 该计划涉及采矿过程实时控制、资源实时管理、矿山信息

网建设、新机械应用和自动控制等 28 个专题<sup>[16-17]</sup>。2015 年, 国务院印发《中国制造 2025》<sup>[18]</sup>, 明确提出了未来十年需要逐步实现数字化研发设计工具普及率 84%, 关键工序数控化率 64% 等一系列的宏伟目标, 显然矿业行业也不例外。目前, 矿业行业生产信息化、智能化仅覆盖极小部分, 主体的发展方式依然严重落后, 产能过剩、资源利用率低、信息化程度不高, 矿业行业需要智能、需要技术、需要创新。2016 年 11 月 15 日, 国土资源部发布《全国矿产资源规划(2016~2020 年)》<sup>[19]</sup>, 明确提出未来 5 年要大力推进矿业领域科技创新, 加快建设数字化、智能化、信息化、自动化矿山, 大力发展“互联网+矿业”。而无人工作面、遥控采矿、无人矿井等却早已在芬兰、美国、瑞典和加拿大等国成为现实<sup>[20-27]</sup>。我国大多数煤矿企业的信息化建设处于数字矿山阶段和感知矿山阶段, 也有少数煤矿企业迈入了智能化矿山阶段。但硬岩矿山的信息化、智能化矿山建设尽管早已提到议事日程, 但大多集中于有关智能化矿山的理论与理论层面, 智能矿山的建设尚需持续发力。随着矿山转入深部矿床开采, 由于深井开采存在着高地应力、高温等突出问题, 使采矿作业安全更差和效能更低, 实现矿山的智能化更显必要和迫切。

有鉴于此, 本文作者阐述了硬岩矿山变革安全高效开采构思和智能化矿山构建, 并以开阳磷矿为例, 探索出了一条集数字化、信息化、智能化和资源循环利用为一体的现代化矿山建设发展模式。

## 1 硬岩矿山开采发展历程

矿业界特别是硬岩开采矿山有两个梦想: 一是实现非爆连续开采; 一是实现矿山智能化无人化开采。国际矿业界一直推崇硬岩矿山的非爆连续开采和矿山智能化无人化开采, 早在 20 世纪 90 年代就开始了这

些方面的前期研究, 希望实现传统矿山向连续化智能矿山转变。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, 如图 1 所示。

### 1.1 矿山开采历程

截止到目前, 矿山开采模式大致经历了 4 个阶段<sup>[3, 16, 21]</sup>: 1) 原始阶段, 即主要通过手工和简单挖掘工具进行矿产采掘活动, 无规划、低效率、资源浪费极大; 2) 机械化阶段, 即大量采用机械设备进行矿产生产活动, 机械化程度较高, 但规划主要凭经验、生产较粗放、资源浪费比较严重; 3) 数字化矿山阶段, 采用自动化生产设备进行作业生产, 采用信息化系统作为经营管理工具, 实现数字化整合、数据共享, 但仍面临系统集成、信息融合等诸多问题, 而且核心仍围绕扩大开采量, 对绿色开采、人文关怀、可持续发展等方面仍不够重视; 4) 智能化矿山阶段, 通过智能信息技术的应用, 使矿山具有人类般的思考、反应和行动能力, 实现物物、物人、人人的全面信息集成和响应能力, 主动感知、分析、并快速做出正确处理的矿山系统, 如图 2 所示。

### 1.2 非爆连续开采现状

20 世纪末, 采矿业发达国家率先进入深部开采时, 传统钻爆采矿方法的缺陷就已暴露出来, 一些学者开展一系列相关研究, 试图找到一种取代传统爆破的高效破岩方法, 如掘进机破岩、高压水射流破岩、液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂破岩、热力破岩、微波破岩、电磁破岩、激光破岩等<sup>[6-9, 28-33]</sup>。其中以机械破岩、水射流破岩为基础的非爆连续采矿方法取得了较为突出的成果<sup>[34-41]</sup>。机械破岩是最典型的一种非爆开采方法, 它起初多用于较软矿岩的规模开采, 适宜矿岩强度通常在 10~70 MPa<sup>[34-35]</sup>。因此, 大部分煤矿都实现了机械化连续采矿, 这是因为煤矿及其围岩较软, 采用机械

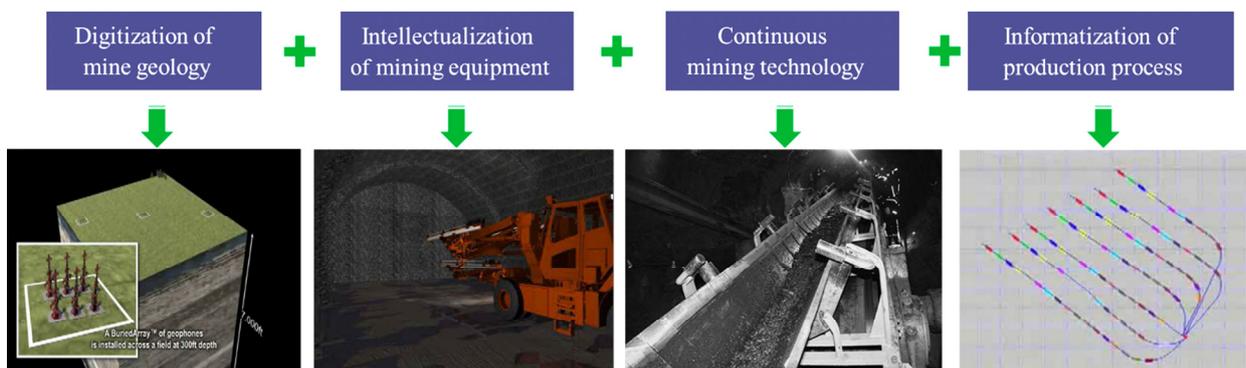


图 1 智能化连续化非爆连续开采模式

Fig. 1 Mining model for intelligent and continuous mining without explosives

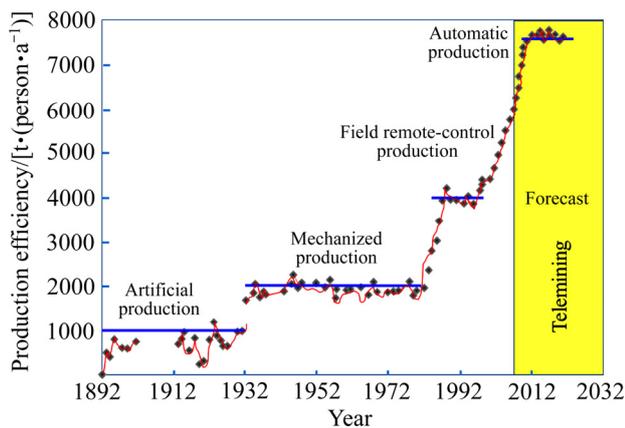


图2 智能化矿山发展步骤<sup>[21]</sup>

Fig. 2 Development steps of intelligent mine<sup>[21]</sup>

设备进行直接掘进回采既能达到很高的生产能力又能改善工人作业环境。许多软岩矿山也都开始了机械化开采的研究与应用<sup>[40]</sup>。但当这些机械切割设备应用于硬岩矿床时，由于硬岩的高硬度和高磨蚀作用，应用受到直接限制。后随着落矿机械设备的不断改进，部分机械式采矿机可切割岩石强度达 100~300 MPa，采矿生产效率比传统凿岩爆破方法提高了数倍之多。另一种比较成功的硬岩非爆破破碎开采方法是水射流方法<sup>[37-39]</sup>；20 世纪 70 年代初，美国 MAURER 等率先开展了超高压射流试验，而后美国瑞德公司进行了系列研究，于 70 年代末在井深 3000 m 实现了 138 MPa 的工作泵压；1985 年 Flow Industries 公司投资 1700 万美元进行超高压专项研究，将泵压提高到 245 MPa，大大提高了破岩效率。而后，在高压水射流中加入耐蚀磨料的技术，使磨料水射流技术更加经济地应用于岩石破碎中。此外，将多种非爆破岩开采方法结合起来进行矿岩破碎或开采也是目前国内外采矿界的研究热点。1997 年初，RICHERZHAGCH 博士领导的小组开展激光与水射流组合切割的实验研究，美国矿山局还将微波应用到岩石破碎当中，美国能源部与 Alpine 装备公司则在水射流辅助机械切割技术方面进行了大量研究，都大幅度地提高了破岩效率<sup>[37-39]</sup>。这些非爆破岩方法和技术虽都已经达到应用程度，但多用于巷道掘进或二次破岩，不适用于大规模采矿，而且这些新技术的设备造价和使用费用都比较高，相对目前采矿成本来讲仍十分高昂。

实现金属矿连续开采是全球矿业界的追求目标，硬岩开采中钻爆法工序不连续，强扰动引起的衍生灾害多，探索硬岩非爆连续开采技术。古德生院士在 20 世纪 80 年代就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连续开采技术，大大提高了采矿

效率，但仍采用钻爆法，生产作业不连续，且深井应用受到限制；美国、欧共体(欧盟)等矿业发达国家针对硬岩大力研究机械与水射流等传统的非爆开采技术，但由于能耗大、刀具磨损严重、成本高，未能得到普及<sup>[30]</sup>。由此可见，真正意义上的非爆连续开采及工业化还有很长的路要走。显然硬岩矿山实现非爆连续开采需满足两个必要条件<sup>[14]</sup>：高效能采掘设备和有发育的岩体节理等结构，而对地下开采矿山而言，机械装备水平直接决定了采矿效率。因此，如何利用先进的机械设备、信息技术等实现矿山连续开采进而提高采矿效率一直以来都是研究的焦点<sup>[41]</sup>。尤其在深部资源的开采环境中，如果能研制成功的落矿机械设备，利用深部高应力状态，采取较小的机械扰动致使破岩，然后与先进的装载、运输设备配套使用，实现全机械化非爆连续开采，这样不仅可以实现高效连续开采，而且能降低生产事故率，实现安全生产。

### 1.3 资源循环利用情况

矿山固体废物(废石和尾矿等)具有危害和利用的双重性，一方面，矿山固体废弃物堆存占用大量的土地资源，易引起植被破坏、土地退化与沙漠化以及粉尘与水体污染等，且易诱发重大工程与地质灾害(排土场滑坡、泥石流、尾矿库溃坝)；同时矿山固体废物是一种宝贵的二次资源，有着量大和矿物伴生成分多的显著特点。20 世纪 70 年代以来，矿业发达国家通过制定一系列环境保护法律法规来严格限制矿产资源的勘查和开发<sup>[42]</sup>，如澳大利亚矿业企业均要依法编制矿山环境保护和矿山关闭规划，政府则设立“矿山关闭基金”；加拿大自然资源部启动了“绿色矿业”倡议(GMI)<sup>[43]</sup>，通过生态系统风险管理，减少污染物排放，创新与不断完善废物管理和矿井闭坑与复垦等一系列研究改善矿业环境；南非颁布了《矿产法案》并建立了矿山环境恢复保证金制度；美国相继颁布了《国家环境政策法》和《露天采矿土地复垦法》等一系列法律制度对矿山环境保护监督和矿山环境治理。我国国土资源部在 2010 年也正式出台《国家级绿色矿山基本条件》<sup>[44]</sup>，从依法办矿、规范管理、综合利用、技术创新、节能减排、环境保护、土地复垦、社区和谐、企业文化九个方面对绿色矿山的的基本条件进行规定，极大推动了我国绿色矿山资源循环利用与建设的兴起及纵深发展。

20 世纪 70 年代之前，矿山主要固体废弃物的研究停留在发展处理技术与降低二次污染方面，现逐步上升到能源和资源的回收方面，国内外目前对矿山固体废物资源化利用主要途径如图 3 所示。废石和尾

矿的资源化包括物质转移、再回收与能量转移等方面。物质转移是利用尾矿或废石制造新的物质, 如生产玻璃、水泥等; 再回收指回收其中的有用元素或矿物; 能源转移指从其中回收能源等。我国在资源循环利用方面取得了一定的成效, 但现有矿产资源利用率很低, 其减排和综合利用的难点在于: 尾矿类型多、成分复杂、且粒度细, 有价元素含量相对较低; 产生量大, 缺乏高效环保、经济适用、大用量、能够将全部尾矿吃干榨尽的技术; 现有回收和综合利用工艺复杂, 难度与投资大、能耗与成本高, 经济效益差; 此外市场机制调节作用薄弱、回收利用渠道不畅通、资源来源不稳定等问题也制约了矿山资源的循环利用[45]。

### 1.4 智能化开采情况

早在 20 世纪 90 年代, 加拿大国际镍业公司 INCO 在 Sudbury 某实验矿山开始了智能化矿山实践—遥控采矿技术, 目标是实现整个采矿过程的遥控操作。同时定义了遥控/远程采矿(Telemining)<sup>[21]</sup>: “利用目前最先进的技术, 包括地下通讯、定位、工艺设计、监视和控制系统, 去操纵采矿设备与采矿系统”。遥控采矿工艺包括自动凿岩、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, 其技术基础是高速地下通讯系统和高精度地下定位、定向系统(要求达到 mm 级)<sup>[15]</sup>。加拿大已制订出一项拟在 2050 年实现的远景规划: 即从加拿大南部城市 Sudbury 通过卫星操纵北部冰冻地区矿山的所有设备实现机械自动破碎和自动切割采矿<sup>[20-23]</sup>。芬兰采矿工业部门也于 1992 年宣布了自己的智能采矿技术方案, 涉及采矿实时过程控制、资源实时管理、矿山信息网建设、新机械应

用和自动控制等 28 个专题<sup>[15-16]</sup>。俄罗斯智能矿山工程 VIST Group<sup>[24]</sup>攻克了露天无人采矿关键技术。瑞典制定了向矿山自动化进军的“Groimtechnik 2000”战略计划<sup>[15]</sup>。欧盟启动了未来智能深矿井的创新技术与理念(Innovative Technologies and Concepts for the Intelligent Deep Mine of the Future, i<sup>2</sup> mine)<sup>[25]</sup>课题。随着人工智能技术、射频识别技术、卫星导航技术、遥感技术以及并行计算机技术等应用在矿山开采、矿山设计、矿山灾害预警、矿山生产等领域的应用, 一些国际级大型露天矿山已经实现智能化采矿。

我国国家科技部、基金委等机构和相关行业相继立项数字化智能化矿山项目, “十一五”期间开展了《地下采矿设备高精度定位和无人操纵铲运机的模型技术研究》、《数字化采矿关键技术与软件开发》等与智能采矿相关的重点攻关项目; “十二五”又启动了《地下金属矿智能开采技术》863 项目等<sup>[27]</sup>。随着固体资源开采深度的增加, “十三五”期间, 在“深地资源勘察开采”专项下, 设置了“地下金属矿规模化无人采矿关键技术研发与示范”项目, 优先支持开展稀土、钨、锡等稀有、贵重、战略资源智能化矿山建设, 进一步提升优势矿种竞争力水平。

智能化无人采矿技术是以无轨采矿设备的自动化和遥控化为基础, 国际著名的几家采矿设备公司均大力发展各自的自动化智能化采矿装备及相关技术, 如 Sandvik 公司的 AutoMine 项目, Caterpillar 公司的 Minegem 项目和 Atlas Copco 公司 Scooptram Automation System 项目等。近年来, 成套的无轨设备、遥控铲运机与凿岩台车等遥控设备极大地提高了采矿的效率和安全性, 无人驾驶汽车在地下矿山的试运行, 凿岩机器人和装载机器人的研制成功, 保障了矿山安

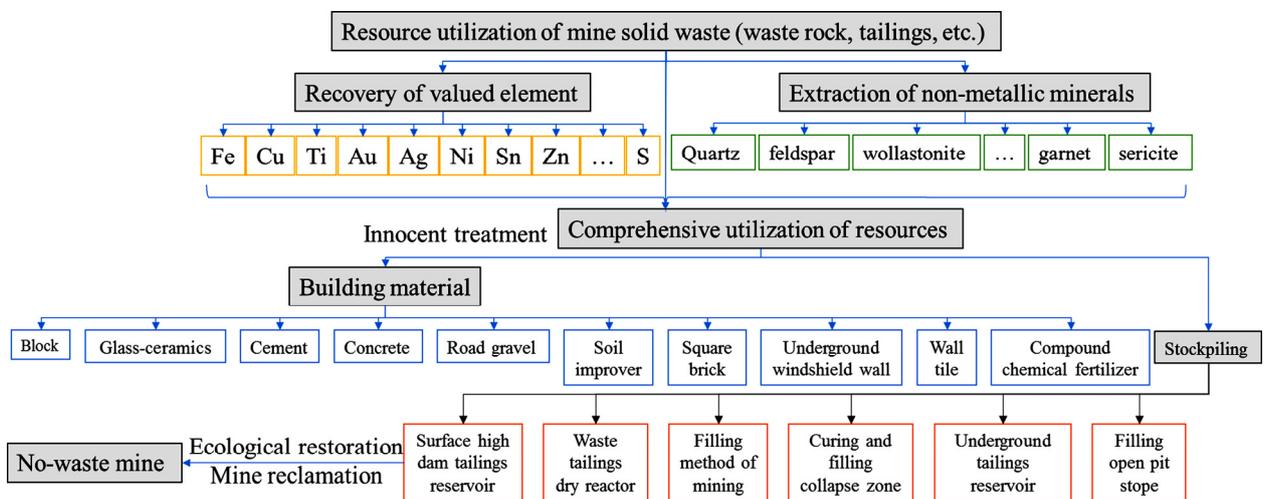


图 3 矿山固体废弃物资源化利用途径

Fig. 3 Resource utilization approaches of solid waste in mine

全、高效、绿色及可持续开采的实施。

“打造成安全高效、绿色环保、数字化智能化国内一流乃至世界知名的新型矿山”，这是我国诸多矿业公司全体员工的“中国梦”。而当前我国的地下智能采矿设备基本处于研究阶段，设备的自动化、智能化及信息化系统与采矿业发达国家的差距很大，现有的无人采矿设备主要依赖进口。

## 2 深部硬岩矿山非爆连续开采

围岩分区破裂和岩爆实质上都是高应力硬岩在人工扰动或卸荷后产生的岩石破碎。分区破裂是开挖后围岩区域岩体结构趋于碎裂；岩爆是岩体内部储能剧烈释放引起岩块猛烈弹射，是岩体由高能态向低能态转化的途径。以往，人们强调岩爆等的被动防护，忽视了岩爆等是岩石破碎的过程，有可控转化的可能，深部高应力硬岩中原岩储能的合理调控，将可实现深部动力灾害能量向矿岩破碎动力源的良性转化。高应力硬岩扰动失稳特性初步证实了这一思路的可行性：通过合理布置人工诱导工程或施加小幅动力扰动，深部硬岩将出现规模化有序破裂，达到矿石的非爆连续开采目的<sup>[46-52]</sup>。

### 2.1 深部硬岩矿山开采方法变革

本文作者给出了高应力、高井深、高地温这三个灾害性因素进行开采方法变革而诱变成有利因素的具体方式与策略<sup>[2-3]</sup>。

1) 高应力。高应力隐含的能量在合适的诱导工程下，有利于极坚硬岩石的致裂破碎，为此可创造一种高应力诱导破碎，实现高应力诱导非爆破连续采矿的方法。为此本文作者已经在开阳磷矿初步实现这一构

想，即通过开挖合理的诱导工程，将深部高地应力能量诱变为用于岩体破碎的有利因素，当高应力在开挖岩体周围形成一定的松动圈后，再利用采矿机械对松动区内的岩体进行截割落矿，大幅度提高深部硬岩的可切削性和开采效率。

2) 高井深。高井深导致的矿石提升困难，人在深部的心理生理等一系列变化，促使我们进行减少提升或不提升矿石的采矿方法变革，同时，也应尽可能实现矿山智能化与自动化，井下少用或不用人员，向智能化无人化开采迈进。另一方面，深井高水头，可作为新的动力源推动高水动力矿浆管道提升运输的研发，即将矿石在地下破碎、研磨后，用水力泵送到地表，在技术经济适宜时，还可建造地下选矿厂，实现废石不出坑。

3) 高地温。一方面，高地温有利于对贵金属或贫矿资源进行原地破碎溶浸采矿，提高矿物溶浸效果。另一方面，井下储存大量的地热能源，将热能送到地面，通过地面的热交换又可实现井下工作面降温。当开采深度到达一定临界值，地温很高，这时，即可实现溶浸开采与地热资源的联合回收，一旦技术成熟将带来采矿工艺的巨大变革，实现真正意义上的绿色流态开采。

### 2.2 高应力诱导机械化开采实例——开阳磷矿

李夕兵等<sup>[14]</sup>在大量实验室实验、机理分析和采矿实践的基础上，于香山会议上提出了高应力硬岩诱导致裂的思想，并通过对开阳磷矿深部磷矿体进行的地质调查和对深部磷矿体开展的高应力硬岩矿山非爆开采试验等，初步论证高应力诱导致裂硬岩采矿切实可行，深部高应力硬岩中原岩储能的合理调控，将有望实现深部动力灾害能量向矿岩破碎动力源的良性转化，如图4所示。进入高应力环境后，相当深度范围

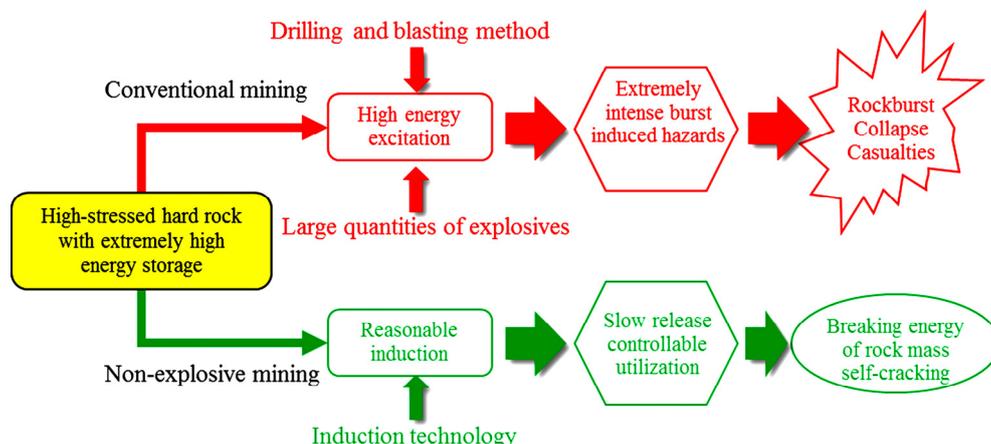


图4 岩爆灾害能向破岩有用能的转化

Fig. 4 Conversion disaster energy of rockbursts into useful energy of rock breaking

内可采用高应力诱导机械化连续开采。

试验地点选择在马路坪矿 640 中段北运输大巷 3 盘区底柱矿房, 矿岩硬脆, 网状节理发育, 属中等稳固-不稳固, 矿体倾角为 35°。为寻求高应力硬岩合理的诱导致裂技术, 通过构建不同断面(圆形、矩形、三心拱)诱导工程下 PFC 模型<sup>[52-53]</sup>, 发现矩形开挖的单位应变能释放率最大, 选最佳诱导工程断面形状为矩形。试验首先用爆破方法沿矿体走向开挖一条矩形诱导巷道, 使地应力集中作用于矿体, 待其致裂后, 再

用掘进机开采。该诱导方法将高应力硬岩内部储能的控制利用投入工程实施, 通过布置人工诱导工程, 在多个试验工作面成功实现了高应力硬岩的高效落矿。

基于诱导工程的非爆连续开采实践效果发现: 独头掘进时, 掘进机所截割的是完整的硬岩, 截割头钻进时, 受到阻力较大, 钻进时间较长粉尘大、截齿消耗大; 经过诱导应力集中过程后的矿石机械开采, 粉尘量减少并且切割的矿石呈现块状, 切割效果明显改善, 如表 1 所示。

表 1 致裂前后截齿性能对比

Table 1 Comparison of performance of cutting teeth before and after cracking

Cutting type	Dust	Mine heap	Pick tooth	Cutting mine/t	Pure cutting time/min	Turn on time/h	Cutting efficiency/(t·min <sup>-1</sup> )
Before cracking				240	200	12	1.2
After cracking				240	120	10	2

### 3 硬岩矿山循环经济模式构建与实践

#### 3.1 硬岩矿产资源可持续循环经济模式

我国矿产资源储量丰富但禀赋不佳, 具有复杂、难选、低品位、多金属共生的特点, 多年来大规模持续强化开采使得金属矿产资源日益枯竭资源, 且总回收率和利用率低。另一方面, 矿山开采带来的环境问题日益突出, 如采场滑坡、排土场泥石流、尾矿库溃坝、侵占土地、植被破坏、土地退化、水土流失、粉尘污染、水体污染, 区域生态景观遭到破坏等。金属矿产资源高效循环利用的潜力巨大, 如尾矿、表外矿、极贫矿、境界外矿、复杂难选矿、冶金尘泥等。长期以来, 我国矿产资源的开发, 走的是“先污染、后治理”, “先开发、后恢复”, 甚至“只开发、不恢复”的老路, 按照“资源—产品—废弃物污染”的发展模式, 矿山发展速度越快, 付出的资源与环境代价越大。而循环经济倡导的是一种资源环境和谐的经济发展模式, 本质上是一种生态经济, 要求运用生态学规律而

不是机械论规律来指导人类社会的经济活动, 以互联的方式进行物质交换, 最大限度利用进入系统的物质和能量, 达到“低开采、高利用、低排放”的目的<sup>[54-56]</sup>。循环经济与传统经济的区别见图 5。因此,

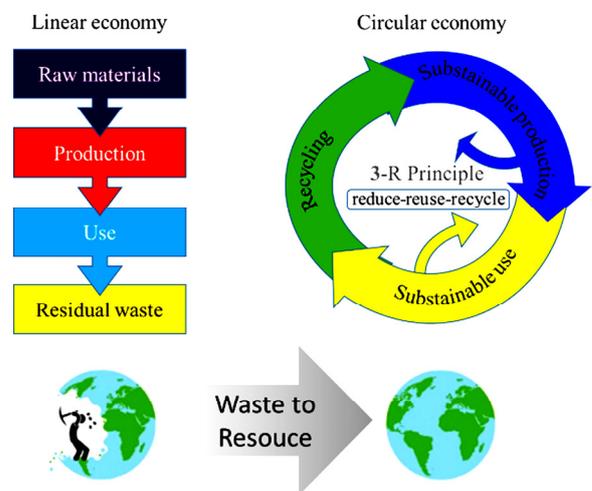


图 5 传统经济模式与循环经济模式对比

Fig. 5 Comparison between traditional economic model and circular economy model

以资源—经济—环境平衡发展为基点，建立资源节约型经济结构；大力推行矿业循环经济，开展金属矿产资源合理开发与高效循环利用，提高资源和环境效率，是解决不可再生矿产资源开发利用效率低、实现资源合理利用和可持续利用的有效途径。当前我国矿业推进循环经济、实现可持续发展的基本思路详见图6。

### 3.2 开阳磷矿循环经济模式实践

贵州开磷集团股份有限公司是我国重要磷化工基地，磷矿开采规模800万t/a，且建有重钙厂、磷铵厂、黄磷厂等多家磷矿深加工与精化企业。众所周知，磷矿开采及磷化工产生大量磷废料—磷石膏、黄磷渣、废石等，这些磷废料长期堆存地表，不仅占用土地、破坏生态环境，而且易诱发地质和工程灾害，给矿山生产及人民生活带来严重的安全与环保隐患。随着国家大力倡导发展矿产资源循环经济政策的实施，减少资源损耗与实现资源绿色开发、运用先进技术提高资源综合利用率，转变经济增长方式，减少废弃物排放已成为矿业开采的新方向。开磷集团循环经济运行模式总体框架见图7所示，其主要划分成4个子系统部分组成，分别为经济效益、社会效益、资源效益、环境效益。环境效益主要可实现企业内部经济运行的低成本和高效率，提高矿区区域内的综合效益，使矿区生态环境质量得到根本性改善和恢复，通过节能减排使矿区内的生产活动由资源依赖型转变为资源节约型

和环境友好型。社会效益是通过发展循环经济，积极参与企业所在地循环经济，将不断促进矿区居民的生活和工作环境得到显著改善，使矿区和所在地社会进一步和谐，矿区和企业所在地的经济迅速发展，从而增加矿区人员收入，并为矿区和社会提供大量就业机会，产生良好的社会效益。资源效益主要是通过循环经济产业链将废物作为再生资源利用，减少废物排放对环境的污染，同时也提高了资源利用率，减少对资源的需求，间接地降低了资源开发可能带来的生态环境影响。经济效益主要通过循环经济产业链使企业提高原材料和能源的使用效率以及再生利用废弃物而降低了生产成本，从而使开磷集团循环经济产业链在遵循一般企业获取价值模式的同时，其中的价值创造更多的来源于企业因充分利用副产品和废弃物而获得的附加收益。

为此，开磷集团创建了磷石膏黄磷渣充填工艺与相应技术，建立了以磷石膏、黄磷渣的井下充填系统，研发了新型耐水磷石膏砖与改性磷石膏路基建材；同时建立了井下废石胶结充填系统，开发了磷矿废渣烧结砖与白云岩—混凝土砌块等生产线，实现了井下废石的综合利用，如图7~9所示。经过多年不懈努力，开磷集团已经基本实现了磷矿山废料的综合利用，正逐步向无废害开采方向发展。磷矿回采率由68.7%提高至85.95%，贫化率由5.89%降低至4.66%。磷矿开采废料利用率100%，其中磷石膏利用量185.17万t/

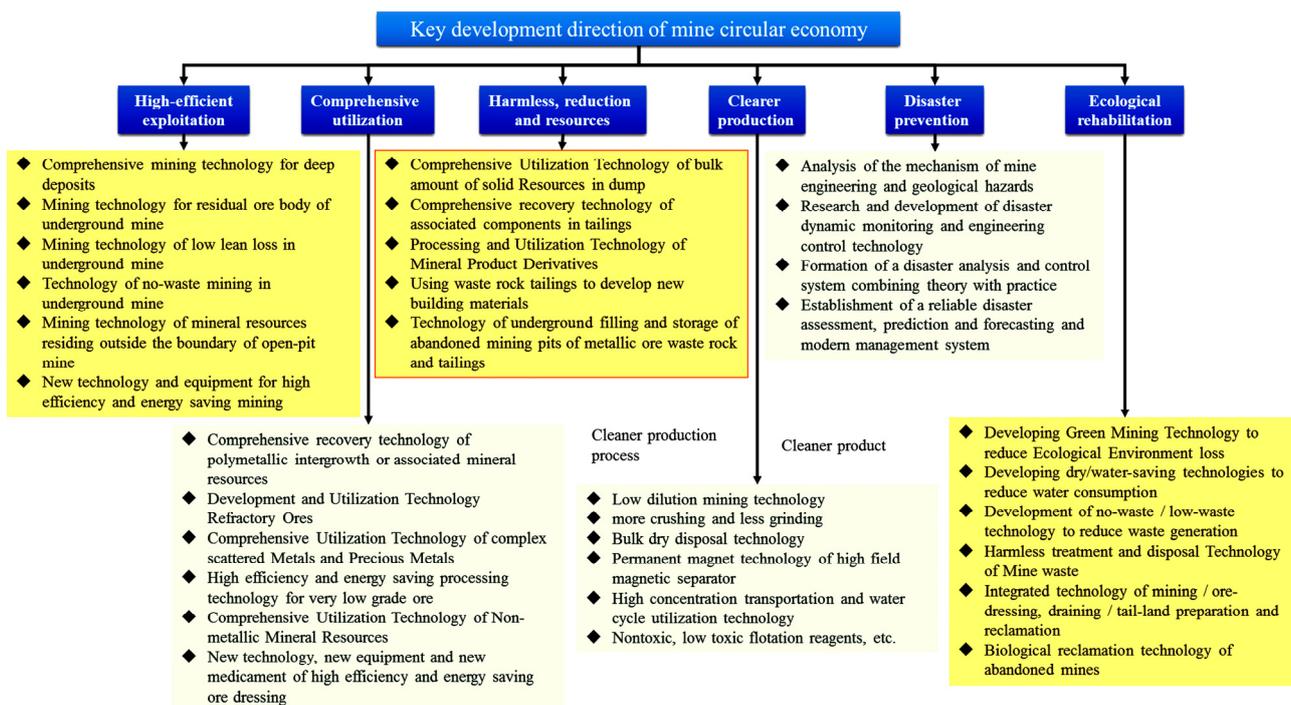


图6 矿业循环经济发展框架

Fig. 6 Development framework for mining circular economy

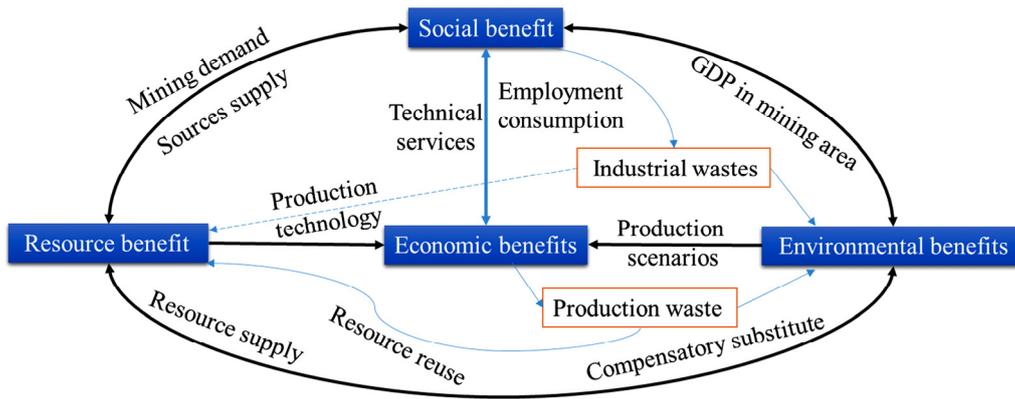


图 7 开磷集团矿业循环经济发展模式构建原则

Fig. 7 Construction principles of circular economy development mode of Kaiyang group mining industry

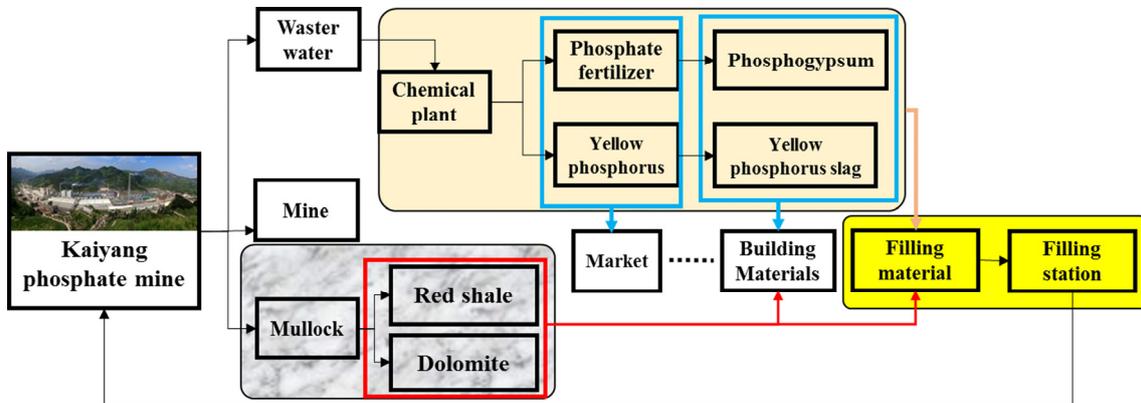


图 8 开磷集团矿业循环经济发展模式

Fig. 8 Development mode of circular economy of Kaiyang group mining industry

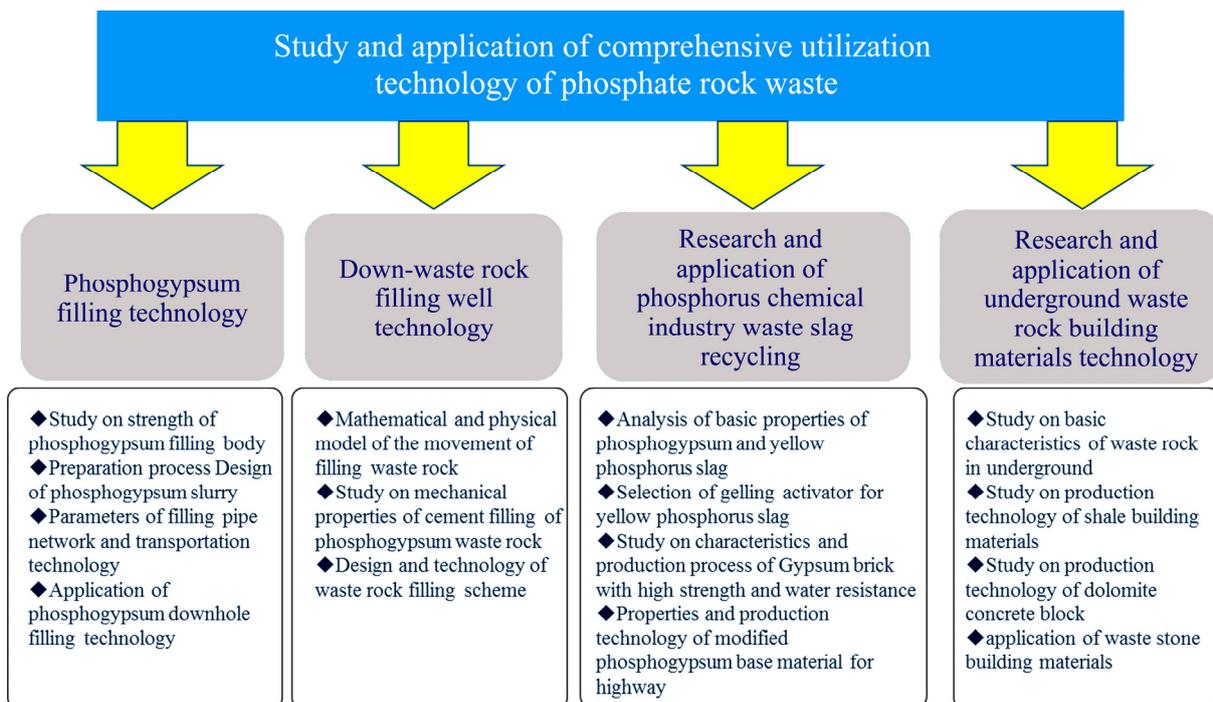


图 9 开磷集团矿业循环经济实现方法

Fig. 9 Implementation method of circular economy of Kaiyang group mining industry

年，黄磷渣利用量 29.88 万 t/年，废石利用量 147.74 万吨/年，降低了废料对地表生态环境的破坏，减少了土地资源占用与地质灾害产生，形成了磷矿资源综合利用和节能减排、环境保护相协调的新型发展模式，提升了企业整体竞争力，带动了全行业的循环经济发展。已成功应用在开磷集团五个矿山，年创直接经济效益 18430.07 万元。其中，矿石回采率提高，增加经济效益 10672.10 万元；减少磷废料堆放，增加经济效益 6248.97 万元；磷废石建材资源化，增加经济效益 1509.00 万元。推广应用前景广阔。

### 4 智能化矿山构建

#### 4.1 智能化矿山总体架构

本文作者认为：智能化矿山的总体构架必须满足资源与开采环境可视化、生产过程与设备智能化和生产信息与决策管理科学化。为此必须借助数字化建模软件、信息采集系统、光纤环网，人机交互系统和数

据传输系统等，架构三维可视化集成平台，继而实现设计智能化、监测可视化、设备自动化、生产系统无人化和管控一体化，如图 10 所示。

图 11 给出了传统矿山向智能矿山迈进的构建过程，传统矿山最初采用纸质档案和人工工作图的劳动密集型开采，逐步过渡到人工操作机械和平面矿图的机械化采矿，然后借助遥控设备和矿山地质模型实现遥控化采矿，再进一步通过运用物联网感知和数字矿山的智能化采矿，最终实现集智能化的信息平台、智能化的矿山开采和多元化的数字建模为一体的智能矿山。这是一个循序渐进的过程，是随着信息化智能化技术发展而不断进步和创新的过程。

#### 4.2 矿山智能化构建实例——开阳磷矿

开磷集团是国内第一家实现磷石膏充填采矿法的大型磷矿山企业。2005 年伊始，贵州开阳磷矿率先在国内探索智能化采矿，经过多年不懈的努力终于摸索出了一条数字化、信息化、智能化为一体的现代化矿山建设发展模式，开采过程全程采用了机械化，部分

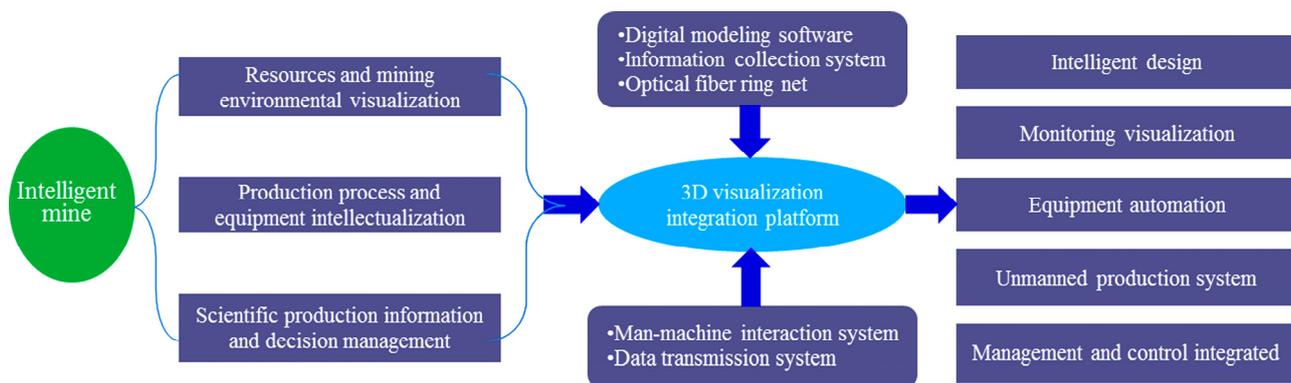


图 10 智能化矿山总体架构<sup>[3]</sup>

Fig. 10 Technology system of intelligent mine<sup>[3]</sup>

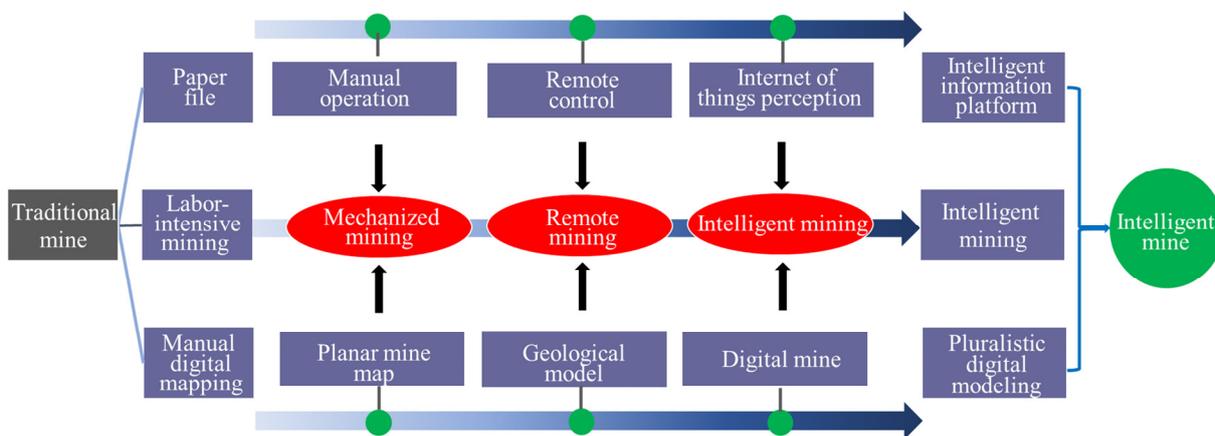


图 11 传统矿山向智能矿山构建过程<sup>[3]</sup>

Fig. 11 Construction process of traditional mine to intelligent mine<sup>[3]</sup>

采用了遥控与远程控制, 主要开采系统实现了无人化与自动化, 井下生产过程与调度指挥系统实现了信息化与可视化, 建成了国内领先、世界一流的现代化矿山。目前, 开磷集团已基本具备开展无人采矿的基础, 井下采矿设备主要有智能凿岩台车、铲运机、胶带输送机、连续掘进机等, 通过高速数字通信网络, 利用计算机技术对采矿设备进行远程控制实施作业。此外, 开磷磷矿采掘、充填、运输、计量、财务管理等各个环节涉及面广, 数据复杂, 开磷集团于 2011 年与北京金蝶公司合作, 共同开发了管控一体化平台, 使矿山生产、经营管理的各个环节与生产要素实现专业化、信息化管理, 矿山生产呈现安全、高效、低耗的局面, 有效解决了“信息孤岛”难题<sup>[57-58]</sup>。

### 4.3 开磷智能化矿山构建主要模块

#### 4.3.1 资源与开采环境可视化

##### 1) 智能化规划与设计

依据矿床地质数据库等资料, 借助 Surpac、micromine、3Dimine、Dimine 和 MapGis 等软件建立矿床三维可视化模型(见图 12), 实现地质资源的数字化和三维可视化, 即矿体边界品位和技术经济指标的自动生成, 以及采矿工艺与开采方案的智能化规划与设计。

##### 2) 井巷支护可视化

基于数字矿山可视化模型, 通过岩体质量分级, 开发了矿山井巷支护标准化辅助决策系统(见图 13), 可进行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。基于数字矿山地质力学模

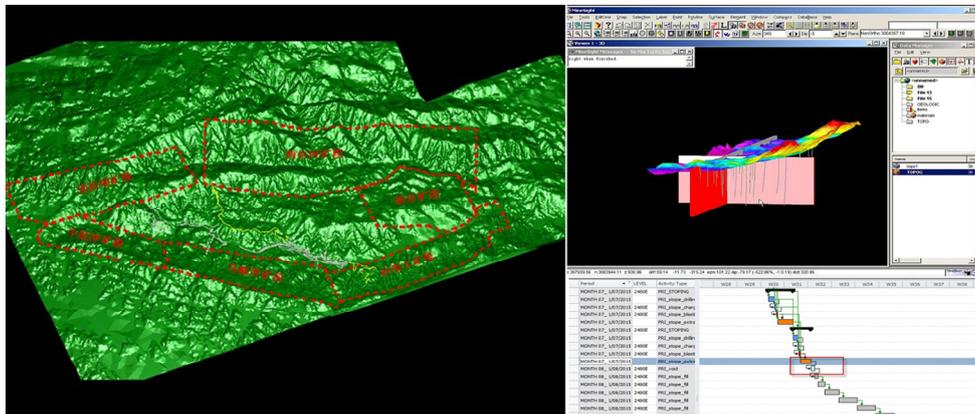


图 12 智能化规划与设计

Fig. 12 Construction process of traditional mine to intelligent mine

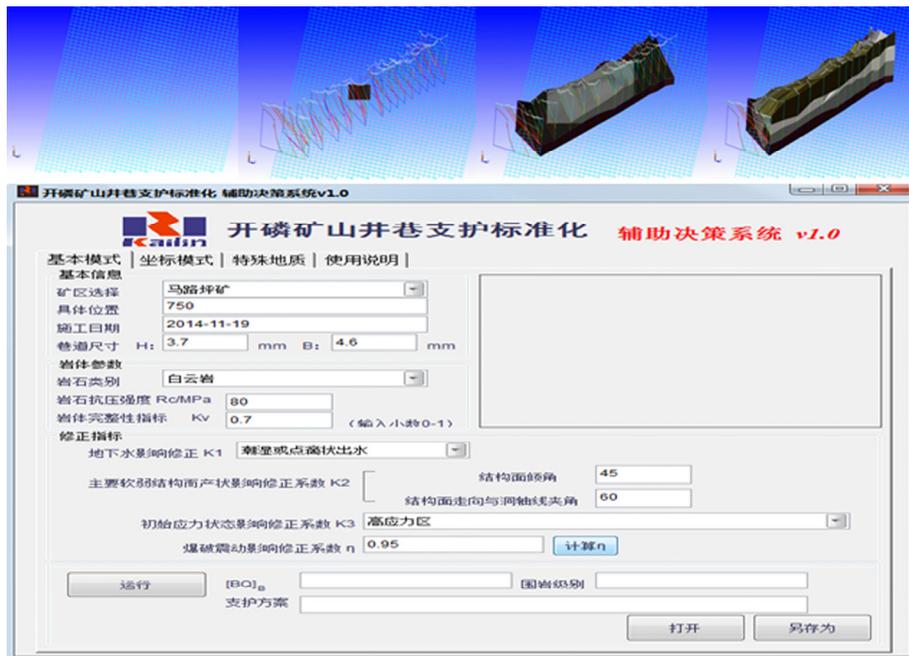


图 13 井巷支护标准化辅助决策系统

Fig. 13 Auxiliary decision system for support standardization of roadway

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,已获2项国家软件著作权。

### 3) 实时高精度地压自动预警

结合三维可视化平台,建立矿山微震监测系统,实时感知岩层动力扰动信息,精确定位采场高应力分布位置,实现高精度地压自动预警,确保安全、高效、科学采矿(见图14)。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,对微震事件的定位范围可达到20 m之内,已获3项国家发明专利。

#### 4.3.2 生产过程与设备智能化

##### 1) 开采辅助系统的无人化

井下通风系统、供水排水系统、变电设备、胶带运输系统、液压破碎设备、振动放矿设备等固定设备均在视频监控下由地面控制中心实行远程集中控制,

实现通风系统智能化、供排水系统无人化、计量系统信息化和提升运输自动化,从而减少井下生产人员,提高了劳动效率(见图15)。

##### 2) 充填系统自动化

开阳磷矿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16)。

##### 3) 设备自动化与远程操控

在井下安装高清摄像头、可编程监控器和简易操作台,通过光缆与操作室内视频系统连接,构建了井下视频图像数据的实时在线同步传输系统,研发了国内首套地下矿山破碎机远程操控系统,实现了生产采掘全电脑控制、采场出矿遥控作业和地下破碎站破碎机的地面办公化同步操控,从而达到了节省人力资源、改善工作环境、提高作业效率及操作安全性的目的,如图17所示。

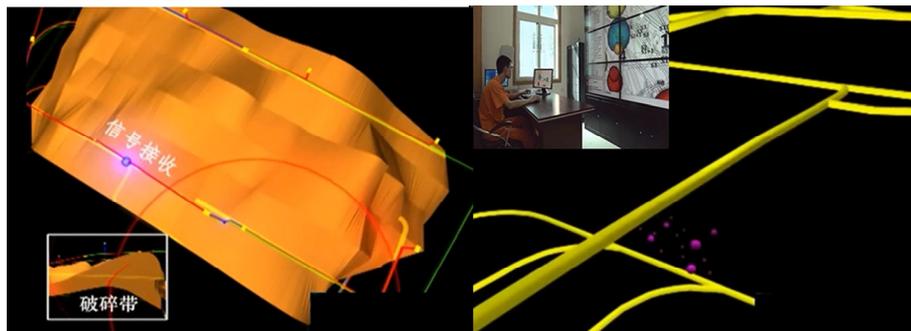


图14 高精度微震实时安全预警系统

Fig. 14 High precision microseismic real-time security early warning system

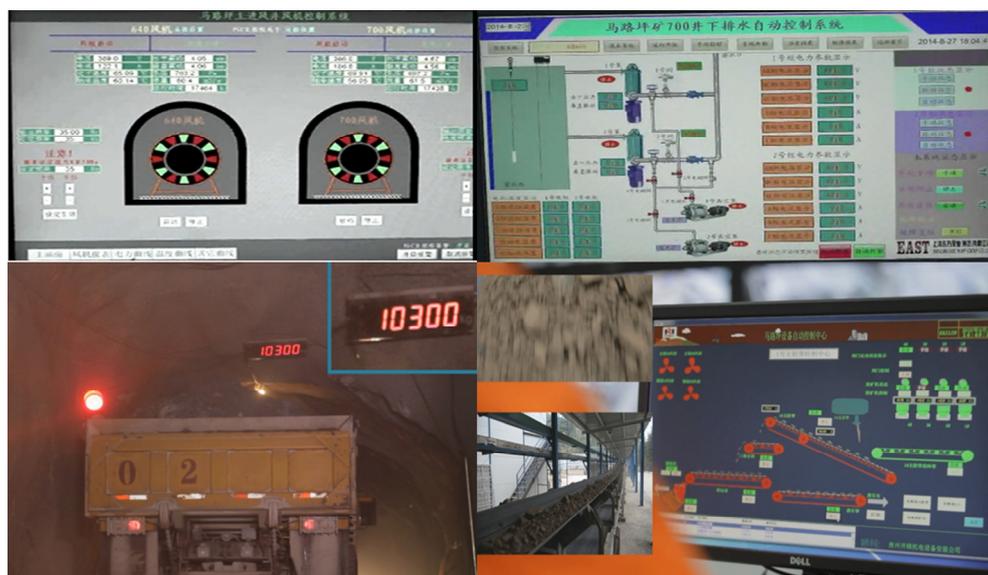


图15 开采辅助系统的无人化

Fig. 15 Unmanned mining auxiliary system

### 4.3.3 生产信息与决策管理科学化

#### 1) 生产信息实时在线监测

通过各种传感器以及视频、通讯设备对矿山生产动态信息进行实时在线监测, 为矿山安全管理预警、应急救援辅助决策提供信息化数据支持(见图 18)。

#### 2) 井下人员设备精确定位

开磷集团青菜冲矿、马路坪矿和用沙坝矿等 3 个矿分布较远, 且采用多中段分区开采, 井下作业战线长, 点多面广。结合矿井生产条件, 按照盘区布置和

人员组织形式, 分矿区、片区运用 RFID 射频自动识别技术和 ZigBee 无线通信技术, 开阳磷矿建成了集人员定位、日常管理、工作考勤、灾后急救等多项功能于一体的井下人员综合管理系统, 搭建了由移动视频、设备定位跟踪以及语音对讲三个子系统组成的井下设备监控与定位系统, 并实时显示在调度指挥系统图上, 使调度人员及时准确了解人员动态对生产信息进行准确判断和指挥, 并实现了井下人机 3 m 范围精确定位(见图 19)。



图 16 开阳磷矿充填系统自动化<sup>[3]</sup>

Fig. 16 Automation system of backfilling in Kaiyang phosphate mine<sup>[3]</sup>



图 17 设备自动化与远程操控

Fig. 17 Equipment automation and remote control



图 18 生产信息实时在线监测

Fig. 18 Real time on-line monitoring of production information

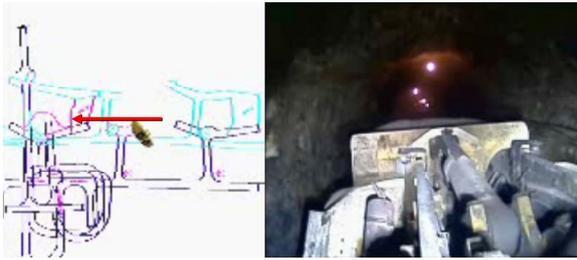


图 19 机车移动视频监控与定位系统

Fig. 19 Locomotive mobile video monitoring and positioning system

### 3) 采掘生产物资管理

基于 K3 供应链、EAS、HR 等管控平台，建立了开阳磷矿采掘生产物资管理系统，统一记录、展示、分析和管理的矿山生产物资采购、库存、消耗以及企业人事、固定资产等业务(见图 20)。

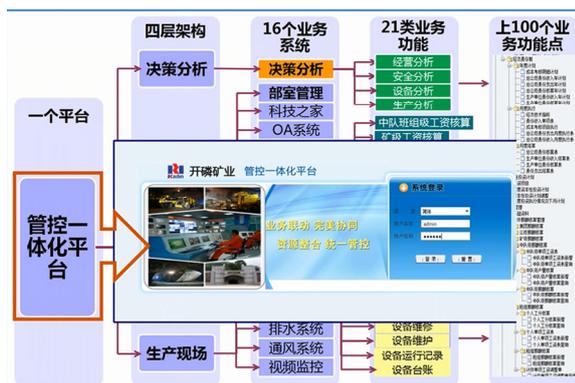


图 20 采掘生产物资管理系统

Fig. 20 Material management system for mining and production

### 4) 决策分析与反馈系统

为实现管理信息化，基于 ERP/MES/PCS/BI 交互分析系统，开阳磷矿与金蝶公司合作开发了管控一体化管理平台，将设计、计划、生产组织、远程控制、视频监控、物资管理、人事管理、成本考核等均集成于该平台，构建生产现场、业务系统、资源管理、决策分析 4 层架构，建立 16 个业务子系统，实现 100 多个功能点。目前在马路坪矿试运行的管控一体化系统有五大板块，分别为设备管理版块、基础数据管理版块、系统平台版块、生产管理和经营管理版块，系统界面见图 21。构建的开阳磷矿科学化决策分析与反馈系统，实现了从底层数据采集到数据智能分析再到科学决策和实时反馈的层次化多功能协



图 21 管控一体化管理平台

Fig. 21 Management and control integrated management platform

同，解决了矿山生产、销售、设备、能源、劳资及财务等多项复杂管理难题。

## 5 结语

本文秉承“变害为利”的思想，详细介绍了硬岩矿山开采方法变革的可行性和实现高应力、高井深和高地温等灾害性因素诱变成深部硬岩矿山开采有利因素的途径和方法，给出了通过诱导工程，实现硬岩矿山非爆连续开采的实例，同时以开阳磷矿构建智能化循环经济矿山为例，详细阐述了智能化绿色开采矿山的发展和构建过程，为硬岩矿山的绿色智能无人开采提供了示例。

## 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, 黄麟淇, 周 健, 王少锋, 马春德, 陈江湛, 刘志祥, 李启月, 赵国彦. 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.
- LI Xi-bing, HUANG Lin-qi, ZHOU Jian, WANG Shao-feng, MA Chun-de, CHEN Jiang-zhan, LIU Zhi-xiang, LI Qi-yue, ZHAO Guo-yan. Review and prospect of mining technology in hard rock mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1828–1847.
- [4] 李毅中. 谈谈我国的安全生产问题[EB/OL]. [http://www.gov.cn/gzdt/2006-07/01/content\\_325165.htm](http://www.gov.cn/gzdt/2006-07/01/content_325165.htm), 2006.
- LI Yi-zhong. Talk about the issue of safe production in China [EB/OL]. [http://www.gov.cn/gzdt/2006-07/01/content\\_325165.htm](http://www.gov.cn/gzdt/2006-07/01/content_325165.htm), 2006.
- [5] 国家安全生产监督管理总局. 2007 年度全国非煤矿山事故分析[R]. 2008.
- State Administration of Work Safety and Administration. Analysis of National Non-coal Mine Accidents in 2007 [R]. 2008.
- [6] Franz Xaver Spachtholz. Non-explosive mining systems for hard rock mines[EB/OL]. <http://www2.tu-berlin.de/~bg/projects/rip-e.htm>. 1996.
- [7] Franz Xaver Spachtholz. Operational conditions for continuous mining systems in hard rock open pit[EB/OL]. <http://www2.tu-berlin.de/~bg/projects/fraes-e.htm>. 1996.
- [8] SINGH S P. Non-explosive applications of the PCF concept for underground excavation[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998, 13: 305–311.
- [9] PICKERING R, YOUNG C, DIMILLO T. The innovative application of tunnel digging machines and non-explosive rock breaking to high speed development[C]//The 6th International Symposium on Mine Mechanization and Automation. Johannesburg: South African Institute of Mining and Metallurgy, 2001: 49–54.
- [10] 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.
- [11] 古德生, 李夕兵. 有色金属深井采矿研究现状与科学前沿[J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(2): 1–5.
- GU De-sheng, LI Xi-bing. Science problem and research state of deep mining in metal and nonferrous mines[J]. Mining Research and Development, 2003, 23(2): 1–5.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 吴立新, 汪云甲, 丁恩杰, 朱旺喜, 张瑞新, 张申, 王植. 三论数字矿山——借力物联网保障矿山安全与智能采矿[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 357–365.
- WU Li-xin, WANG Yun-jia, DING En-jie, ZHU Wang-xi, ZHANG Rui-xin, ZHANG Shen, WANG Zhi. Thirdly study on digital mineserve for mine safety and intellimine with support from IoT[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 357–365.
- [16] URONEN P, MATIKAINEN R. The intelligent mine[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1995, 28(17): 9–19.
- [17] SEPPANEN P. Intellimine research and development[J]. World Mining Equipment, 1993, 11: 15–16.
- [18] 国务院关于印发《中国制造 2025》的通知[EB/OL]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content\\_9784.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm).
- Notice of the State Council on Printing and Distributing “Made in China 2025”[EB/OL]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content\\_9784.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm).
- [19] 全国矿产资源规划(2016–2020 年)[EB/OL]. [http://www.mlr.gov.cn/zwgk/ghjh/201612/t20161205\\_1423357.htm](http://www.mlr.gov.cn/zwgk/ghjh/201612/t20161205_1423357.htm).
- National Mineral Resources Planning (2016–2020) [EB/OL]. [http://www.mlr.gov.cn/zwgk/ghjh/201612/t20161205\\_1423357.htm](http://www.mlr.gov.cn/zwgk/ghjh/201612/t20161205_1423357.htm).
- [20] SHUEY S A. Mining technology for the 21st century: Inco digs deep in Sudbury[J]. Engineering and Mining Journal, 1999, 200(4): 18.
- [21] BAIDENGR. Telemining systems applied to hard rock metal mining at inco limited. Underground Mining Methods:

- Engineering Fundamentals and International Case Studies[M]. Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc (SME), 2001: 671–679.
- [22] SCOBLE M. Progress of Canada mine automation: From digital mine to full mine automation[J]. CIM Bulletin, 1995(5): 30–36.
- [23] STENTZ A, OLLIS M, SCHEDING S, HERMAN H, FROMME C, PEDERSEN J, HEGADORN T, MCCALL R, BARES J, MOORER. Position measurement for automated mining machinery[C]/Proc of the International Conference on Field and Service Robotics, 1999: 299–304.
- [24] VIST Group. Intelligent Mine—The Future of Mining! [EB/OL]. <http://www.slideshare.net/dmitryklebanov/intelligent-mine-future-of-mining>.
- [25] SKAWINA B. Project: Innovative Technologies and Concepts for the Intelligent Deep Mine of the Future[EB/OL]. <http://www.i2mine.eu/>.
- [26] MCHATTIEL. Advances in mining engineering to enable information mobility for ‘intelligent mining’[C]/23th World Mining Congress, Montreal, Quebec, 2013: 12.
- [27] 古德生. 智能采矿—触摸矿业的未来[J]. 矿业装备, 2014(1): 24–27.  
GU De-sheng. Intelligent mining—Touch mining future[J]. Mining Equipment, 2014(1): 24–27.
- [28] LI X B, ZHAO F J, FENG T, DENG X M. A multifunctional testing device for rock fragmentation by combining cut with impact[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19: 526–528.
- [29] LINDROTH D P, BERGLUND W R, MORRELL R J, BLAIR J R. Microwave assisted drilling in hard rock[J]. Tunnels & Tunneling International, 1993, 25(6): 24–27.
- [30] MOMBER A W. Wear of rocks by water flow[J]. Int J Rock Mech & Min, 2004, 41(1): 51–68.
- [31] BENAFAN O, NOEBE R D, HALSMER T J. Shape memory alloy rock splitters (SMARS)—A non-explosive method for fracturing planetary rocklike materials and minerals[R]. NASA/TM–2015–218832, National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2015: 1–42.
- [32] LAZIC V, RAUSCHENBACH I, JOVICEVIC S, JESSBERGER E K, FANTONI R, DI FINO M. Laser induced breakdown spectroscopy of soils, rocks and ice at subzero temperatures in simulated martian conditions[J]. Spectrochimica Acta Part B, 2007, 62(12): 1546–1556.
- [33] HAASE R G B. Non-explosive mining: An untapped potential for the South African gold-mining industry[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1991, 91(11): 381–388.
- [34] GENET M, YAN W, TRAN-CONG T. Investigation of a hydraulic impact: A technology in rock breaking[J]. Archive of Applied Mechanics, 2009, 79(9): 825–841.
- [35] LI Xiao-hong, WANG Jian-sheng, LU Yi-yu, YANG Lin, KANG Hui-ming, SUN Jia-jun. Experimental investigation of hard rock cutting with collimated abrasive water jets[J]. Int J Rock Mech & Min, 2000, 37(7): 1143–1148.
- [36] SUMMERS D A. Waterjet drilling systems[M]. London UK: E&FN Spon, 1995.
- [37] HOOD M. The use of water jets for rock excavation[C]/HUDSON J A, ed. Comprehensive Rock Engineering (Vol. 4)—Excavation, Support and Monitoring, Elsevier Ltd, 1993: 229–260.
- [38] GOLOVANEVSKIY V A, BEARMAN R A. Gouging abrasion test for rock abrasiveness testing[J]. Int J Miner Process, 2008, 85: 111–120.
- [39] YOUNG C, GRAHAM C. Controlled-foam injection—Progress towards automated hard rock excavation[C]/Proceedings of the 5th International Symposium on Mine Mechanization and Automation, Sudbury, Ontario, 1999: 39–45.
- [40] WANG S, LI X, WANG S. Three-dimensional mineral grade distribution modeling and longwall mining of an underground bauxite seam[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 103: 123–136.
- [41] 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.
- [42] 刘学, 郑军卫, 赵纪东, 王立伟. 国际矿产资源科技政策发展历程及其对我国的启示[J]. 世界科技研究与发展, 2017, 39(2): 122–128.  
LIU Xue, ZHENG Jun-wei, ZHAO Ji-dong, WANG Li-wei. Evolution of global mineral resources science and technology policy and its inspiration to China[J]. World Sci-Tech R&D, 2017, 39(2): 122–128.
- [43] Natural Resources Canada. Green Mining Initiative[EB/OL]. [2018–06–20]. <http://www.nrcan.gc.ca/mining-materials/green-mining/8178>.
- [44] 国土资源部. 国家级绿色矿山基本条件[J]. 国土资源, 2010(8): 32.  
Ministry of Land and Resources. Ministry of Land and

- Resources: Issue “Basic Conditions for National Green Mines” [J]. *Land and Resources*, 2010(8): 32.
- [45] 马茁卉. 国内外资源循环利用管理对比与借鉴[J]. *中国国土资源经济*, 2015, 28(4): 31–33.
- MA Zhuo-hui. Domestic and foreign resource recycling management comparison and reference[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2015, 28(4): 31–33.
- [46] LI X B, MA C D, CHEN F, XU J C. Experimental study of dynamic response and failure behavior of rock under coupled static-dynamic loading[C]//Proceedings of the ISRM International Symposium 3rd ARMS, Rotterdam: Mill Press, 2004: 895.
- [47] 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.
- [48] LI X B, CAO W Z, TAO M, ZHOU Z L, CHEN Z H. Influence of unloading disturbance on adjacent tunnels[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 84: 10–24.
- [49] TAO M, LI X B, LI D Y. Rock failure induced by dynamic unloading under 3D stress state[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2013, 65: 47–54.
- [50] DU K, TAO M, LI X B, ZHOU J. Experimental study of slabbing and rockburst induced by true-triaxial unloading and local dynamic disturbance[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(9): 3437–3453.
- [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): 767–82.
- [52] 姚金蕊. 深部磷矿非爆连续开采理论与工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- YAO Jin-rui. Non-explosive continuous mining theory and technology research in deep phosphate mine[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [53] 邹洋, 李夕兵, 周子龙, 尹士兵, 殷志强. 开挖扰动下高应力岩体的能量演化与应力重分布规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(9): 1677–1684.
- ZOU Yang, LI Xi-bing, ZHOU Zi-long, YIN Tu-bing, YIN Zhi-qiang. Energy evolution and stress redistribution of high-stress rock mass under excavation disturbance[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(9): 1677–1684.
- [54] 常前发. 矿业开发与循环经济[C]//中国钢铁工业协会, 2005年中国钢铁工业协会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- CHANG Qian-fa. Mining development and circular economy[C]//The China Iron and Steel Association, Proceedings of the China Iron and Steel Association in 2005, Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.
- [55] KORHONEN J, HONKASALO A, SEPPÄLÄ J. Circular economy: The concept and its limitations[J]. *Ecological Economics*, 2018, 143: 37–46.
- [56] STAHEL W R. The circular economy[J]. *Nature News*, 2016, 531(7595): 435.
- [57] 邱宇, 王进, 肖凌. 基于 Digital Mine 架构的开磷现代化矿山建设[J]. *有色金属科学与工程*, 2010, 1(2): 69–72.
- QIU Yu, WANG Jin, XIAO Ling. On the modernization construction of Kailin mining on the basis of digital mine[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2010, 1(2): 69–72.
- [58] 王梅, 姚金蕊. 开磷集团现代化矿山建设的发展与思考[J]. *现代矿业*, 2015(8): 1–6.
- WANG Mei, YAO Jin-rui. Development and consideration of the modern mine construction of Kailin Group[J]. *Modern Mining*, 2015(8): 1–6.

## Innovation of mining models and construction of intelligent green mine in hard rock mine: In Kaiyang Phosphate Mine as an example

LI Xi-bing<sup>1,2</sup>, CAO Zhi-wei<sup>1,2</sup>, ZHOU Jian<sup>1,2</sup>, HUANG Lin-qi<sup>1,2</sup>, WANG Shao-feng<sup>1,2</sup>, YAO Jin-ru<sup>3</sup>,  
HE Zhong-guo<sup>3</sup>, MA Chun-de<sup>1,2</sup>, DONG Long-jun<sup>1,2</sup>, ZHAO Guo-yan<sup>1,2</sup>

- (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, Changsha 410083, China;
3. Guizhou Kailin Group Co., Ltd., Guiyang 550300, China)

**Abstract:** Based on the elaboration of the history of mining mode, the non-explosive continuous mining and the status of intelligent mines, the mining method of hard rock mines and intelligent mining were discussed in this paper. Based on the stress characteristics of rock and mineral resources in deep mining, and adhering to the idea of “Convert harm into benefit”, a framework for the safe and efficient exploitation of resources in deep earth and circular economy mode of mine were established. The energy release rules and rupture range of hard rock with high stress under special induced drift engineering were revealed. Taking Kaiyang Phosphate Mine as an example, non-explosive continuous exploitation of new models which can moderate disaster in deep hard rock excavation and new patten of harmlessness and cyclic utilization of resources exploitation has been applied in preliminary practice. In order to construct and improve theory framework and method system of intelligent mining, with the help of digital modeling software, information acquisition system, optical fiber ring network, human-computer interaction system and data transmission system, a three-dimensional visualization integration platform of Kaiyang Phosphorus Mine is constructed, including resource and mining environment visualization, production process and equipment intelligence, and scientific production information and decision management. As a result, the mine realizes intelligent design, monitoring visualization, equipment automation, unmanned production system. The realization of the intelligence and non-explosive continuous mining and cyclic utilization practice in the mining engineering provides a reference for the safe and efficient exploitation of deep solid resources.

**Key words:** hard rock mines; non-explosive continuous mining; circular economy; intelligent mine; Kaiyang phosphate mine

**Foundation item:** Project(41630642) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2016YFC0600706) supported by the National Basic Research Development Program of China;

**Received date:** 2018-09-04; **Accepted date:** 2019-08-10

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

(编辑 龙怀中)