



未来有色金属采矿可持续发展实践与思考

黄麟淇^{1,2}, 陈江湛^{1,2}, 周 健^{1,2}, 尹士兵^{1,2}, 董陇军^{1,2}, 马春德^{1,2}, 石 英^{1,2}, 李夕兵^{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: 我国深地、深海、深空战略的布局与实施对未来有色金属采矿可持续发展提出了更高要求。本文在简述贵重有色金属分布及其特点的基础上, 就有色金属的深地、深海、深空采矿现状和开采前景进行了总结和展望。结合有色金属深地开采现状和存在问题, 提出了实现有色金属开采可持续发展必须走精准、连续、智能与绿色开采之路。本文介绍了作者为实现有色金属采矿可持续发展所做的工作, 并给出了对未来有色金属采矿可持续发展的一些思考。

关键词: 有色金属矿山; 可持续发展; 非爆连续开采; 智能化开采; 绿色开采

文章编号: 1004-0609(2021)-11-3436-14

中图分类号: TU45

文献标志码: A

引文格式: 黄麟淇, 陈江湛, 周 健, 等. 未来有色金属采矿可持续发展实践与思考[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(11): 3436-3449. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42049

HUANG Lin-qi, CHEN Jiang-zhan, ZHOU Jian, et al. Practice and thought on sustainable development of nonferrous metal mining[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(11): 3436-3449. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42049

矿产资源的开发利用和矿业的发展, 推进了人类社会的发展和人类文明的进步。从某种意义上说, 一部人类文明史, 就是一部矿产资源的开发史。事实上, 人类的物质需求很大程度上是对能源和资源需求, 而不同时代人类对能源和资源的需求会随着人类使用工具和利用科技的提高而发生改变。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》中指出: 要坚持创新驱动发展, 加强基础研究, 优化学科布局和研发布局, 推进学科交叉融合, 瞄准人工智能、深地、深海等前沿领域, 实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目。在这项国家深地战略的推动下, 矿产资源超千米常态开采和深井竖井开挖等理论与技术取得了长足的进展, 但随着我国深地、深海、深空战略的持续深化实施, 一系列新的科学问题摆在了采矿人的面前, 如: 有色金属

采矿如何融入国家“三深”战略, 最终实现可持续发展? 未来有色金属开采到底路在何方, 是向太空要资源, 还是往深海寻求突破或继续向深地进军? 许多学者对此提出了新的思路、建议和方案^[1-6], 本文将通过探索深地、深海、深空等有色金属潜在区域的资源分布特点, 对未来有色金属采矿潜在的目标与对象进行可行性和现实性分析, 提出实现有色金属开采可持续发展的途径与对策, 并就作者所做的相关工作进行了简要回顾与介绍。

1 贵重有色金属分布及特点

相比煤、石油、铁矿等常规资源, 稀有与贵重有色金属矿产资源种类繁多、分布稀疏、难以提取, 且大都属于战略资源。地球深部和深海区域蕴含了丰富的贵重有色金属, 同样在深空也富含有色金属

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72088101, 51904335)

收稿日期: 2021-07-15; **修订日期:** 2021-10-27

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

资源, 甚至比地球上蕴藏的含量更为丰富、种类更为多样, 如图 1 所示。由于有色金属矿物资源本身品位低, 大多数随地层深度越大矿物品位越低, 且大都属于热液型矿床, 从而导致矿岩硬度强、应力大、温度高, 开采和提取困难, 成本昂贵。虽然中国有色金属矿产资源丰富、种类繁多, 但作为全球有色金属最大生产国和消费国, 保持有色金属开采可持续发展仍具有重大意义^[7]。

1.1 深空资源

太空中的小行星上除了岩石外, 还有黏土、硅酸盐和各种不同的金属, 最多的是镍和铁。多数金属小行星由高达 80% 的铁和 20% 的镍、铱、钨、铂、金、镁和其他贵金属如钨、钽和铪的混合物组成^[8]。例如, 铂族金属是地球上最稀有和最有用的元素之一, 但是据行星资源公司称, 这些金属在小行星上的含量却非常高, 以于一颗直径 500 m 富含铂的小行星所含铂族金属比人类历史上在地球上开采的铂族金属都要多。同时在月球上也存在铀、钍、镍、铀等资源^[9]。

1.2 深海资源

“深海”是指海平面 200 m 以下的区域。深海海域面积约占地球表面积的 65%, 拥有丰富的物种多样性, 是地球上尚未被人类充分认识和利用的最大的潜在资源基地。除海洋油气资源和海滨矿砂

外, 目前海底已知有商业开采价值的还有多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物等金属矿产资源。这些矿物中富含镍、钴、铜、锰及金、银金属等, 总储量分别高出陆上相应储量的几十倍到几千倍^[10-11]。随着人类对有色金属资源需求的不断增加和陆地矿产资源的不断枯竭, 据估计海底矿产资源必将成为人类 21 世纪的接替资源^[12]。

1.3 深地资源

陆地作为地球传统资源的承载体, 其深部蕴藏着大量的矿产资源。例如, 陆地上已发现铜资源量超过 18 亿 t, 未发现的资源量约 30 亿 t^[13]。但是有色金属资源往往在地壳中矿物含量(品位)低, 像金矿品位只有不到 0.3~0.5 g/t, 且随着资源开采继续向下延深, 大多数矿物品位会越来越低, 且矿岩硬度高、应力大、温度高, 开采越来越困难。虽然随着陆地部分资源的开采消耗, 人类获取资源的目光开始转向深海、深空等未知领域, 但预计今后相当长的一段时间内, 有色金属资源的生产和使用主要还是依赖于深地资源。

2 未来有色金属开发对象目标

随着地球浅部资源的枯竭和航天航海等技术发展的日趋成熟, 人们将有色金属资源的开发转向深地、深海和深空领域。例如, 世界采矿大国南非

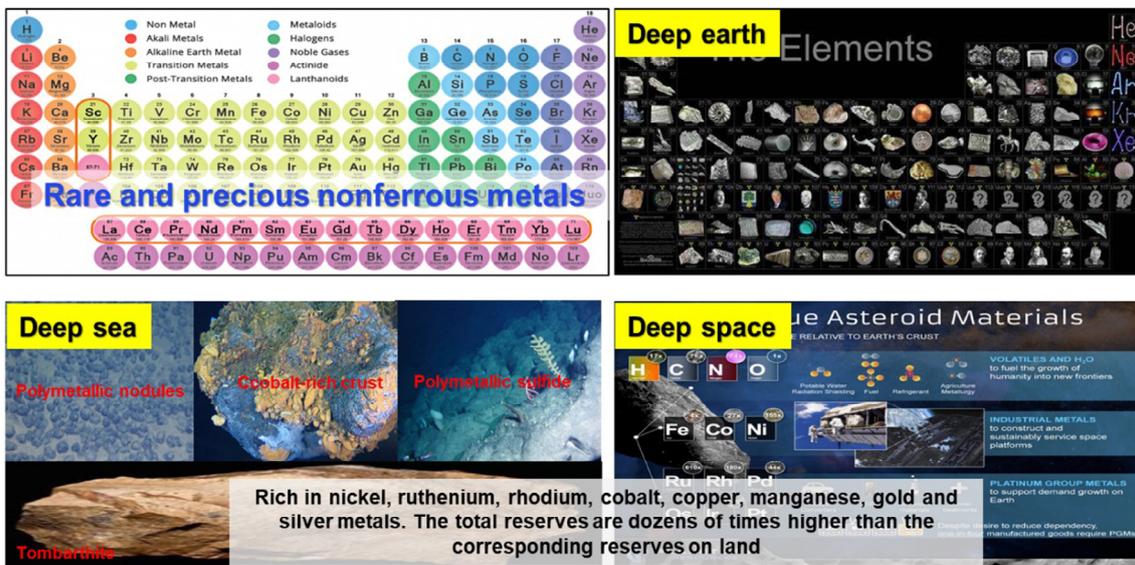


图 1 贵重有色金属分布及特点^[9-11]

Fig. 1 Distribution and characteristics of nonferrous metals^[9-11]

的矿山开采深度已达 4500 m; 深海开采已在蕴藏有大片丰富锰结核的海底或者海底热泉附近试行, 其海平面的深度已达 1400~3700 m; 小行星、月球采矿等太空采矿也在不断实践与摸索中。

2.1 小行星开采

“行星资源”的联合创始人兼联合主席彼得·戴尔蒙迪斯表示, 地球上的许多稀有金属和矿产在太空的数量是近乎无尽的, 这些矿产足够为地球上日益增长的人口提供可持续的有色金属资源^[14]。

行星开采的思路是把助推火箭、太阳帆送到小行星, 让其逐渐推到地球轨道, 再像回收太空舱那样, 让其掉落至目标地点。这种方法的难点是要寻找到合适的高价值的小行星, 让小行星从太阳轨道进入到地球轨道, 这不但要耗费巨大能量, 同时还需要足够时间反向推进来实现减速。

行星开采风险来源于航天器高昂的发射成本, 以及资源巨量增加引发的市场动荡。如若从太空中拉回几千吨的黄金, 黄金价格可能会大幅下降。此外, 还有很多问题需要解决, 如航天器在目标小行星上的锚定、钻孔, 太空的零重力/微重力环境、真空环境、强紫外线环境, 小行星表面的冷热循环、微陨石撞击等。

相关学者也提出将矿物资源在小行星进行原位处理的设想。该设想从技术上考量的确可行, 且比直接返回地球的方案更加合理和经济。但由于小行星上的矿物组成、分布具有不确定性, 且小行星采矿需要在零重力或微重力条件下进行, 那么在那些条件下矿物的获取、分离、处理、提炼和冶炼牵涉到非常复杂的物理化学过程, 将面临许多新的技术瓶颈需要攻克^[15]。

2.2 月球开采

从 1969 年人类首次成功登陆月球以来, 虽然还未真正研究清楚开发这一邻居星球的最佳方案, 但已经发现月球蕴藏丰富的氦-3、钛、钽、铀、钷等矿产资源以及三斜铁辉石、锆石等地球上未发现或非常稀有的资源。由于月球矿产资源开发利用可有效解决地球资源枯竭及环境破坏等全球性问题, 月球已成为新一轮全球范围太空开发竞争的焦点。据《科技日报》报道, 中国将力争在本世纪中叶建成地月空间经济区, 并有专家预测, 到 2050 年前

后, 中国每年在地月空间经济区的总产值可达 10 万亿美元以上规模。欧盟和日本也在紧锣密鼓地准备月球采矿行动。2019 年 1 月 21 日, 欧洲空间局宣布已就月球采矿技术与欧洲火箭制造商阿丽亚娜集团签署了一份为期 12 个月的合同, 并计划于 2025 年开始相关探测任务。阿丽亚娜集团表示, 该任务的目的是提取月球表层风化土。日本月球探测初创伊空公司的专家也曾公开表示, 目前已经可以运送设备并在月球表面着陆, 勘探技术设备包括漫游车和着陆器, 能够携带设备勘探月球水和氧等资源。伊空公司计划了两项月球行动, 首次行动是在 2021 年, 将在月球赤道上放置漫游车, 第二次行动是 2023 年在月球南极开展矿产资源探测研究^[16]。此外, 还有一些政府和商业公司实验室也已规划在月球上进行矿物资源原位处理并设计了如何实现月球采矿的方案, 包括紧凑型发电、太空机器人和风化层开采等, 以期将月球作为人类工业的太空前哨基地。

然而, 月球表面独特的重力、真空及温度等环境和月球地质体特殊的组分、结构及几何特征造就了月壤/月岩的特殊力学特性和工程行为, 且大气层的缺失使月面长期受到宇宙射线的影响。这些将给未来月球采矿和月球基地建设带来前所未有的挑战, 并使月球采矿方法与地球陆地采矿有所区别。为此, 部分支持月球采矿的学者提出了一种直接从月球表层土中解冻冰层的“热采矿法”。其原理是将足够多的热量施加至月球表面, 使得冰越过液相直接升华成水蒸气。之后蒸汽会被收集在一个较大的遮篷中, 重新冷冻并电解成氢和氧。已有研究表明, 该方法可以从月球物质中成功提取燃料成分, 具备切实可行性^[17-19]。

2.3 深海开采

“深海采矿”指的是挖掘深海矿产资源的过程。目前世界各地在海上开展的主要是浅海领域的泥沙、锡矿和钻石开采, 或是海下基岩开采^[20], 而且主要是在一些国家的领海进行的。但是, 在公海领域进行深海开采目前还处于探索阶段。

对海底开采进行管理的组织是国际海底管理局(ISA), 这是一个依照《联合国海洋法公约》(United Nations Convention on the Law of the Sea)成立的管理定制深海资源行为准则的独立机构, 总部位于牙

买加斯顿, 现在共有包括欧盟在内的 168 个国家和地区组织成员。目前该国际组织拟定的开采目标包括镍、铜、钴、锰、锌、银和金等矿产资源。前期勘探工作主要集中于三类海洋矿产资源, 包括深海多金属结核、多金属硫化物(即深海热泉附近形成的“深海块状硫化物”)和覆盖在海底山上的富钴铁锰结壳。勘探区域主要集中在太平洋、大西洋中部和印度洋海域^[21]。

我国对深海资源的开发也在不断探索中。1991 年, 中国大洋矿产资源研究开发协会成立, 为国际海底资源研究与开发活动和我国深海高新技术产业的形成与发展提供了协调和组织保障。联合国于 1991 年批准中国大洋协会成为第五个国际海底资源开发先驱投资者, 该协会为我国争取了一块 15 万平方公里的开辟区, 并制定了我国《大洋多金属结核资源研究开发第一期(1991—2005)发展规划》。经过几十年的不懈努力, 我国在深海勘查、运载和开采等有关技术得到全面提升, 最为显著的成果是实施“大洋一号”现代化改装, 开展深海 7000 m 载人深潜器研制, 进行海上采矿试验系统攻关等具有自主知识产权的深海高新技术。

如表 1 所示, 为了开发深海资源, 国际上一些海洋业发达国家提出了深海采矿方案^[22]。虽然针对海底开采提出了不同技术方案, 也有一些前期的小型实验室和工业试验, 但要实现深海资源商业化开采, 还存在很多问题。例如, 深海采矿时履带-底泥的作用机理、压陷强度-切应力-滑移的复杂规律、海底实时定位、组合导航和水动力特性亟待

研究, 深海采矿系统的整体联动、升沉补偿系统亟待开发, 将结壳从基岩上有效剥离关键技术亟待突破。当然, 也有很多专家认为, 深海采矿是一种短视的资源解决方案, 对生态系统造成巨大影响得不偿失, 会将一场全球危机转换成另一场全球危机。研究表明, 深海采矿会对海洋的生态多样性造成极大的影响, 并且会降低海洋储存二氧化碳的能力(海洋是地球上最大的碳汇体, 储存了地球上约 93% 的二氧化碳), 加剧气候危机。因此, 深海采矿的发展势必会受到种种限制, 实现真正意义上的商业开采还有很长一段路要走, 有色金属采矿的上天下海更多只是各国在战略层面上的考量。

2.4 深地开采

随着陆地资源开采强度的不断增大, 有色金属资源的开采深度在不断增大, 世界上最深的南非姆波尼格(Mponeng)金矿开采深度已达 4500 m, 而我国一些有色金属矿山开采深度已超 1000 m。深部资源潜力巨大, 如三山岛金矿西岭矿区 1600~2600 m 深度已探明储量 400 t 的大型金矿床^[23]。可以预见, 我国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”, 并将深部矿产资源开采理论与技术作为该专项指南方向, 就深部开采理论与技术问题展开研究。因此, 未来有色金属矿深部开采方法与技术的变革必须结合有色金属矿岩和开采的特点进行。这些特点具体表现

表 1 国际上深海采矿系统技术方案对比^[22]

Table 1 International comparison of deep-sea mining system technical proposals^[22]

Technical proposals	Technical characteristics	Year	County	Cost performance	Technical feasibility
Trailer type	Single bucket towed by surface boat	1960	USA	Very low	More feasible
Continuous rope bucket type	A single boat lifts multiple buckets along the rope	1967	Japan	Average	Poor feasibility
Continuous chain bucket type	Double boats lift multiple buckets along the chain	1972	France	Average	Average
Shuttle boat type	Minerals are carried back and forth by boat	1979	France	Very low	More feasible
Pipe lift type	Minerals are pumped to the surface by pipes	1978	America, Japan, Canada and Germany	Veryhigh	Feasible

为：① 矿物品位较低，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 绝大部分矿山均采用凿岩爆破方法开采。鉴于有色金属的矿岩特点，未来有色金属矿开采必须以矿石提升量最小为目标，利用高应力、高地温来变革坚硬矿岩采矿方法，实现深部连续智能化无人开采。为此，我国科研人员提出了随采深增大的有色金属开采模式、变革方式与关键技术，以及深部开采三步走战略^[24-26]，如图2所示。

3 实现有色金属开采可持续发展的途径

无论是今后相当长的一段时间内的深地资源，还是随着技术发展进步后赖以进行商业开采的深海资源或深空资源的开采，要实现可持续发展的前提是在当下的技术经济条件下，矿业开采具有较好的经济与社会效益。因此，为实现有色金属的安全、高效、经济开发，必须走精准、连续、智能与绿色开采的可持续发展之路，如图3所示。

3.1 精准开采

针对煤炭的常规开采，袁亮院士提出了煤炭的精准开采^[27]。然而，对于有色金属开采，因为矿石品位极低、矿岩分界品位随着开采的技术经济水平不断变化和赋存矿段把位的极端复杂性等因素，无论是上天、下海还是入地，有色金属开采的可持续发展更有必要走精准开采之路。对于有色金属的精准开采，开采对象精准探测、开采环境的精准识别和开采状态精准监测尤为重要。在精准开采方面，近年来本课题组做了如下几方面的工作：

1) 提出了深部岩体结构识别表征方法^[28-30]。

如图4所示，该方法通过岩体三维波速场层析精准反演采场的时移地震层析成像，以达到地质结构精准探测。

2) 发明了基于岩芯地表重定位技术的声发射地应力测量方法。根据钻孔岩芯偏斜率和钻孔岩芯位置获得了推演钻孔岩芯空间位置的方法和设备，据此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，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^[31-32]，图5所示为该项技术所需试验设备和作业流程。

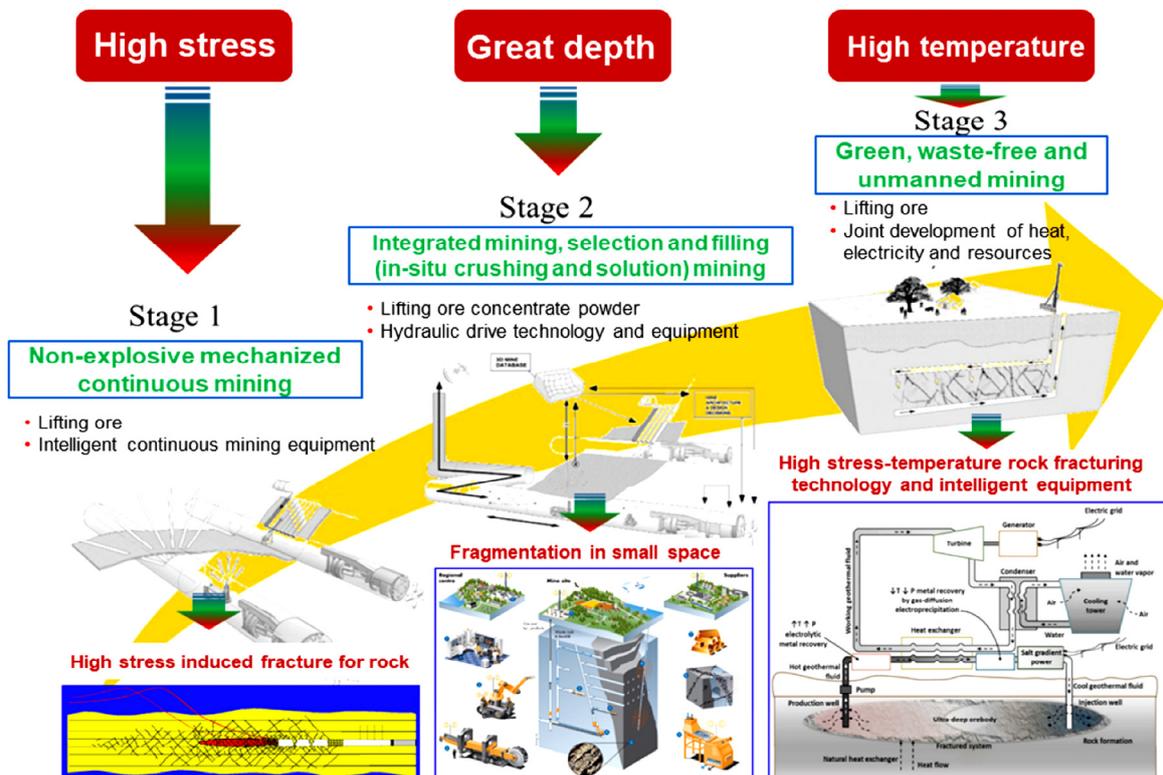


图2 深部开采三步走战略^[24-25]

Fig. 2 Three-step strategy for deep mining^[24-25]

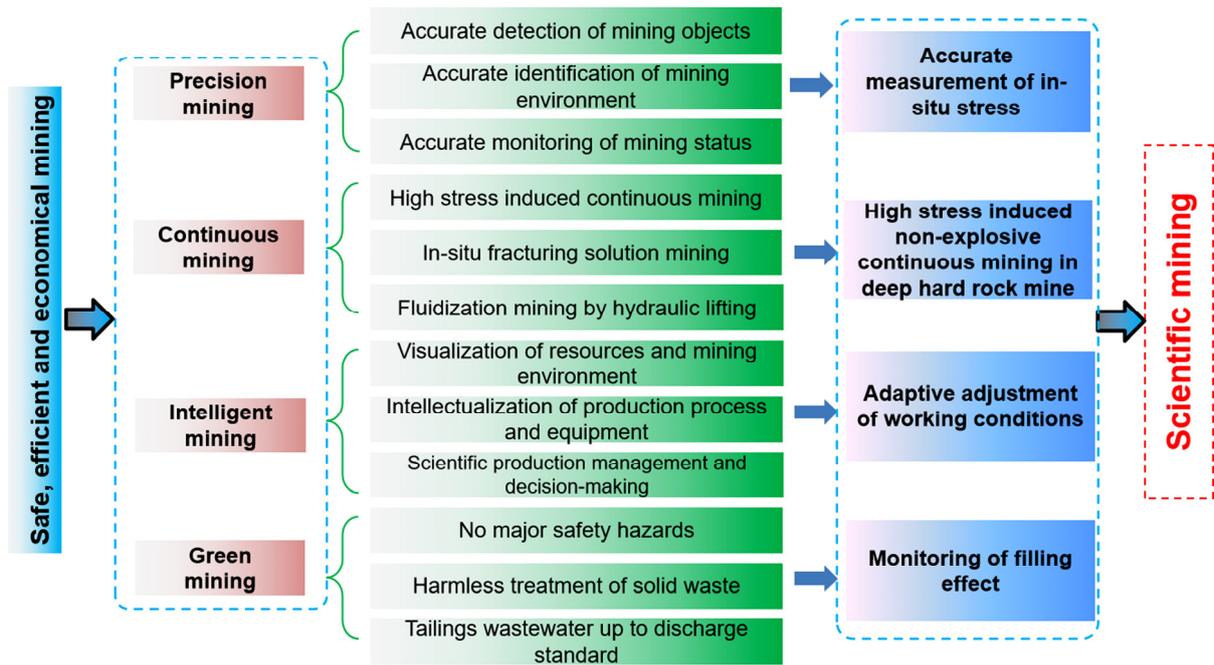


图 3 有色金属开采可持续发展途径

Fig. 3 Sustainable development approaches of nonferrous metal mining

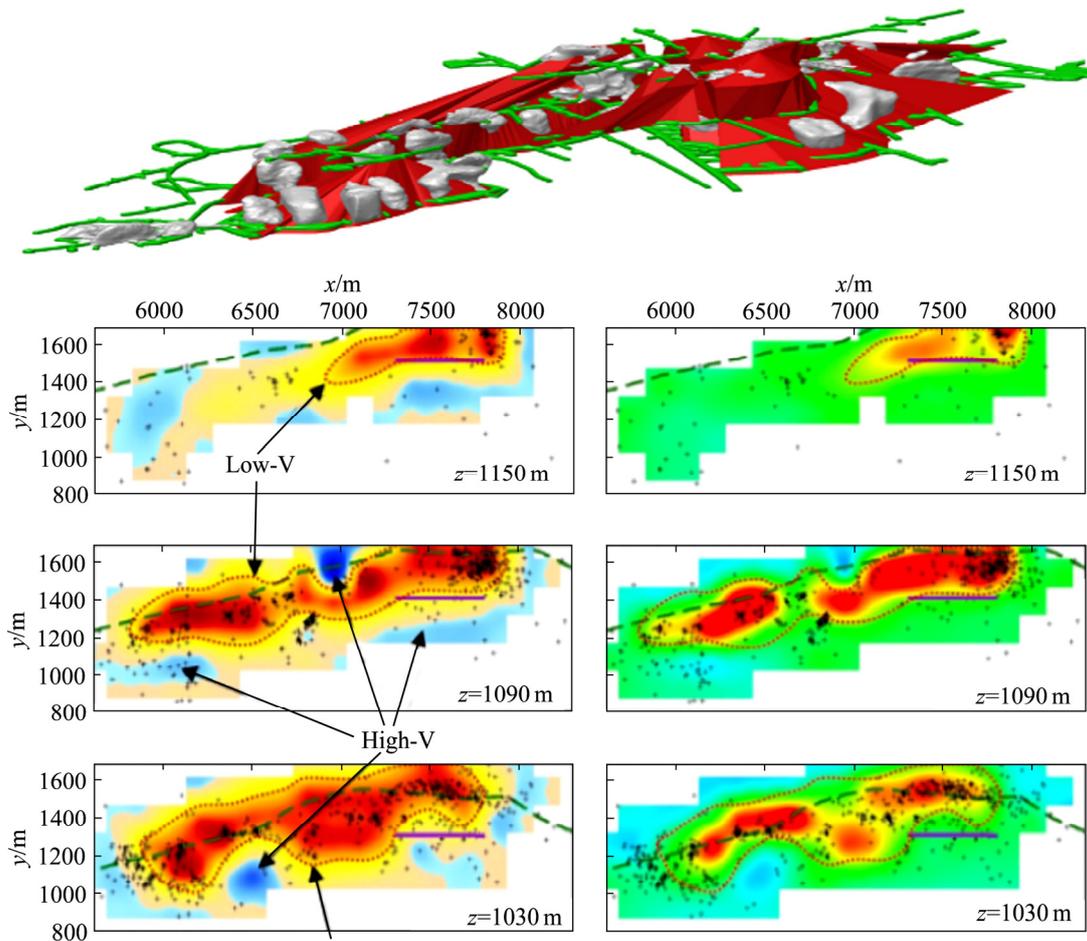


图 4 三维波速场层析精准反演采场的时移地震层析成像^[29]

Fig. 4 Time-lapse seismic tomographies of stope accurately retrieved by 3D wave velocity field tomography^[29]

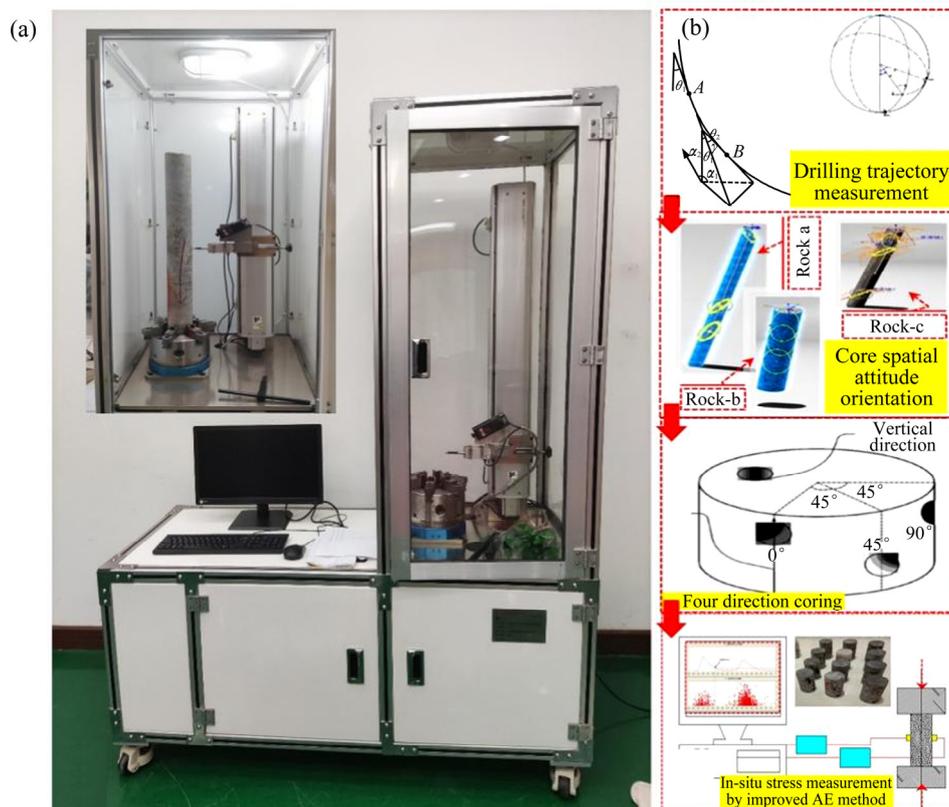


图5 岩芯地表重定位测量实验设备和基于岩芯地表重定位技术的声发射地应力测量方法作业流程^[33-35]
Fig. 5 Experimental equipment for core surface relocation survey(a) and operation flow of AE in-situ stress measurement method based on core surface relocation technology(b)^[33-35]

3) 开发了基于无需预先测速的微震和开采地压精准监测系统。该系统大幅度提高了多中段多采场有色金属开采采场地压定位精度, 实现了微震监测与灾害实时精准预警^[36-37]。图6所示为系统原理和相应设备。

3.2 连续开采

有色金属连续开采最早源于古德生院士提出的以无间柱连续推进为核心的硬岩连续开采, 但由于该方法仍然使用爆破破碎岩石, 在工序过程上是非连续的。而这种非连续性是硬岩的特殊性导致机械办法不能有效破碎岩石所致。进入深部, 或者深海深空环境后, 爆破破碎将会使得工序作业间断且复杂, 这种复杂环境下的高效安全开采必须先实现真正意义上的非爆破的连续开采。对于深地资源, 李夕兵等^[1]提出了随深度变化的开采模式, 可以根据深度不同, 分别采用高应力诱导连续开采、原地破碎溶浸开采和采选冶一体化的流态化开采, 而海底开采中人们最推崇的也是以截齿破岩和水力提

升为主的连续开采方式, 星体和月球开采也广泛建议使用机械化连续开采。

针对未来相当长的一段时间内, 我国有色金属和非金属开采深度将处于 1000~2000 m 的现状, 结合深部硬岩高应力的特点, 李夕兵等^[1, 25, 38-40]提出了高应力诱导致裂非爆机械化连续开采学术思想, 并在开阳磷矿等深部采场开展了高应力诱导下的不同机械破岩的连续开采试验。同时, 根据不同矿山在不同开采深度下深部能量释放和转换规律的现场实践与调查, 提出了不同矿岩条件适用于非爆连续开采的判据准则, 并针对这一方法给出了预切槽硬岩矿体旋转振动连续截割设备和相应采场装置^[41]。实际上, 这一方法的实质 *jiu* 是通过适当的诱导工程, 将深部岩体可能诱发灾害的弹性储能诱变为岩石有序破坏的有用能^[26, 42-43]。

3.3 智能开采

上天、下海、入地都将面临着更为复杂的开采条件和开采环境, 必须实现智能开采。智能开采的

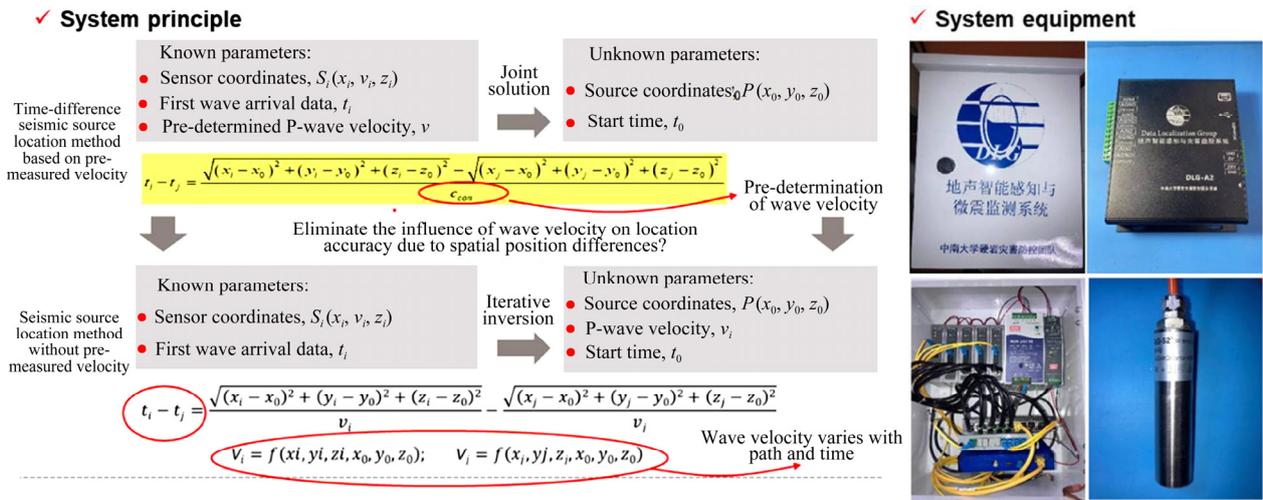


图 6 微震数据采集系统原理及设备^[37]

Fig. 6 Principle and equipment of microseismic data acquisition system^[37]

三个要素, 即开采对象与环境的可视化、生产过程与设备智能化和生产管理与决策的科学化将显得更加重要^[24, 44]。

1) 资源与开采环境可视化。通过资源与开采环境可视化和工况的自适应调整实现智能开采。在开采全过程中, 深度融合矿区地质随钻测量参数、采区布置的各类传感器和掘进设备的反馈参数, 并基于智能分析, 精细可视地展现采区资源和开采环境的动态变化特征。结合矿山技术经济指标与成本数据库建立边界品位动态智能测算程序, 指导现场开采。在这方面, 本课题组 2000 年伊始就以冲头的回弹参数估算岩石可钻性特征为研究起点, 逐步扩展研究开采过程中钻掘设备反馈参数所表征的开采环境参数的动态变化规律^[45]。

2) 生产过程与设备智能化。通过生产过程与设备智能化实现智能开采, 这就要求实现设计智能化、开采连续化、监测可视化、设备自动化、生产系统无人化等智能化控制。在这方面, 本课题组已针对开阳磷矿智能化开采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, 为构建深地资源安全高效智能化

开采发展框架和矿山循环经济模式提供了有益参考^[24]。

3) 生产管理与决策科学化。这是也是智能化开采的一个重要方面。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, 建立生产全信息动态大数据库, 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; 建立生产全时空物联网系统, 统一记录、展示、分析和展示管理矿山生产全时空信息流, 通过云计算技术进行数据整合、分析、挖掘; 建立可视化集成平台, 将生产全时空信息进行集成优化展示, 并进行智能决策; 构建深部开采管控一体化平台, 实现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同, 解决矿山生产、销售、设备、能源、劳资及财务等多项复杂管理难题。

3.4 绿色开采

绿水青山就是金山银山, 为了人与自然和谐共生, 并在 2030 年前实现碳达峰和 2060 年实现碳中和, 有色金属资源开发对绿色开采提出了更高要求。人们就深海开采对海洋生态影响的担心也更加迫使人们思考有色金属可持续发展必须走绿色开采道路。天蓝水青地绿是有色金属开采向深空深海深地进军所必须守住的底线。在未来有色金属向深地进军的相当长的一段时间内, 绿色开采虽然具有丰富的含义和内容, 但至少必须处理好以下三个重

要问题。

1) 无重大安全隐患。深地开采应力大、地压强、温度高,开采过程会显现强烈的地压与诱发岩体动力灾害。当采场空区达到一定面积时,势必会造成大面积崩落。因此,必须推行充填开采,同时建立起精准的地压与灾害预警系统,确保安全、高效、低损失开采。

2) 固体废弃物无害化处置。矿山开采的固体废弃物主要是尾矿和掘进废石。废石通过合适的再加工可作为建筑用料。就尾矿而言,综合利用包括两方面,一是可以作为二次资源再选、再回收稀有元素等金属;二是尾矿的直接利用,可以制备有机肥和建筑材料,如水泥、砖、加气混凝土、耐火材料、玻璃、陶粒、微晶玻璃等,在充填法开采中也可消耗掉相当部分尾矿用于充填地下采空区等。有色金属矿山固体废弃物应按“减量化、资源化、无害化”原则处理。

3) 废水达标排放。深地开采中,采矿、选矿等环节会产生大量废水。一方面,在充填过程中尽量使用采矿或选矿废水,使得大部分污染物在充填过程中被有效固化;另一方面,剩余废水经过污水处理后再达标排放,从而实现含渣废水的零排放^[46],如图7所示。深海采矿作业将给海底、上层水体和周边环境造成影响^[47]。例如,为了开采结核而进行的海底刮擦会破坏章鱼、海绵动物及其他物种的深海栖息地。大量的动物群落集中在深海热泉附近,这些海洋动物组成了地球上最富活力的生态系统之一,而在热泉喷口采矿可能会扰动沉积物,造成

一些动物窒息。其他一些生活于深海、适应了少光高压环境的物种也有可能受到开采带来的噪音和污染影响。因此,我们必须就深海采矿对这些生物或生态系统的影响进行深入研究。

4 未来有色金属可持续发展思考

通过对未来有色金属采矿可持续发展对象进行分析,联系到实现有色金属可持续发展所做工作,以及考虑到实践中碰到的一些问题和疑惑,本文作者深感要实现未来有色金属采矿的可持续发展,必须在以下几个方面继续努力。

1) 实施科学采矿。虽然深空深海存在有大量的有色金属资源,但上天下海离商业化开采还有很长一段距离。有色金属开采在可预见的将来,一定是向深部进军。实现以精准、连续、智能、绿色为目标的深部资源科学开采将是有色金属采矿可持续发展的保障和正确途径。

2) 加强基础性研究。采矿是一门工艺技术,也包含着一些基础性的研究内容。要通过加强基础性问题的研究来实现采矿工艺与技术的创新。本文所介绍的深地、深海、深空开采模式与技术的创新都有赖于国内外进行的大量相关基础性理论与实验研究。本课题组提出的一些面对深地开采的技术,如新的地应力测量方法、高精度地压监测系统、高应力诱导连续开采等,无一不是以大量基础性实验研究下的技术创新。

3) 组织联合攻关。采矿重大关键问题特别是深

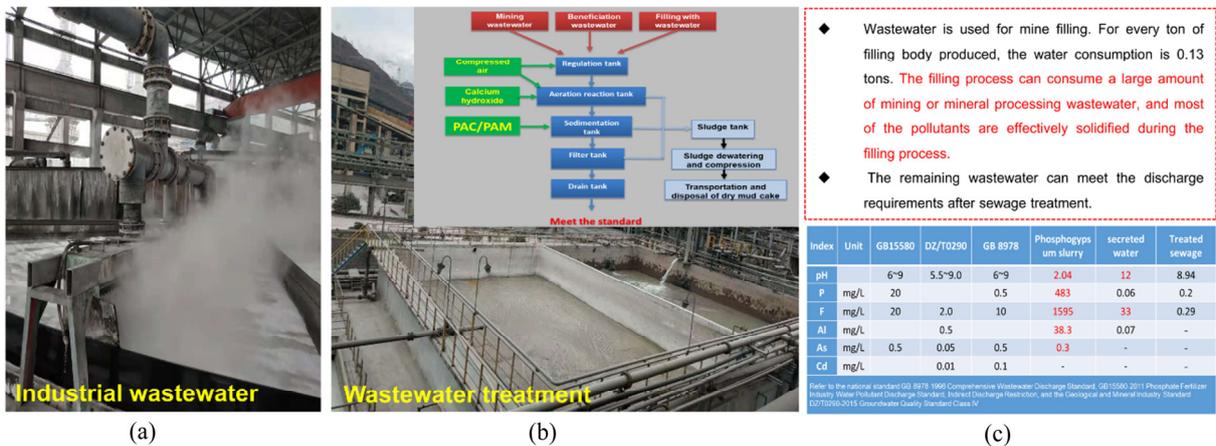


图7 废水达标排放

Fig. 7 Wastewater discharge up to standard: (a) Industrial wastewater discharge site; (b) Wastewater treatment plant; (c) Treatment method and standard parameters

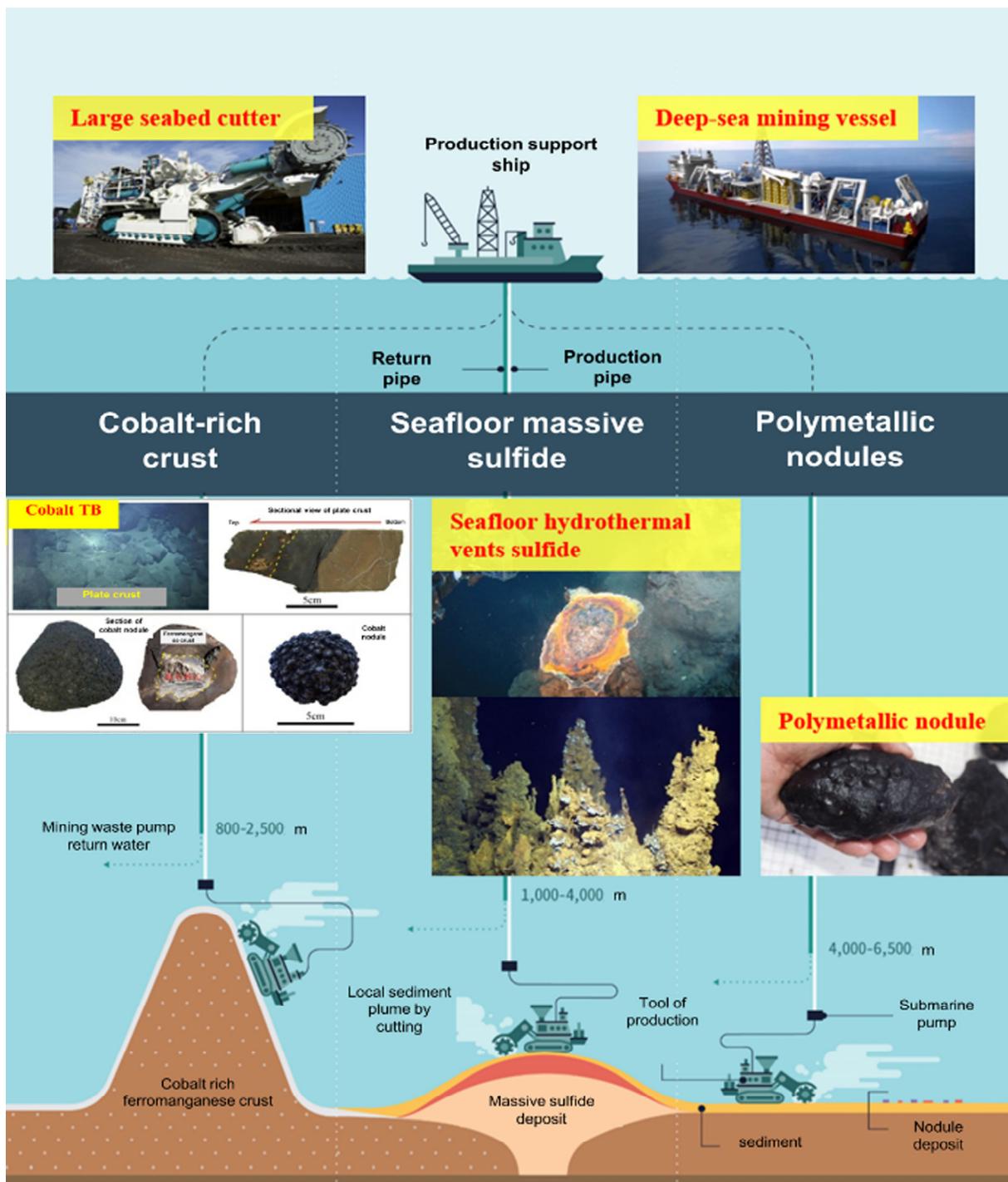


图 8 深海采矿作业^[47]

Fig. 8 Deep-sea mining operations^[47]

地深海深空采矿问题, 要在国家有关部门主导下, 由矿山、科研和设备生产厂家发挥各自优势, 通过既各行其职又通力合作的方式攻关解决。以本课题组提出的高应力诱导破碎非爆连续开采为例, 这是国际上最先提出利用深部岩体储能变害为利的一种硬岩开采变革方式, 有理论基础, 有实验验证,

但要实现工业化就必须国家主导, 多方合作。

4) 稳定职业化队伍。实现矿山的精准、连续、智能、绿色开采, 必须要大幅提高井下采矿人员的工资待遇, 并加强以智能化运用为目标的职业化队伍的建设。高校要对采矿专业人员从事分层级的教育培训, 多开办有学历教育的多层级采矿研修班培

训班, 稳定一支强有力的技术支撑队伍。

5) 加强国际合作。随着我国许多矿山企业走向国门, 应该强化采矿向外延伸发展的途径指导, 竞争国际语言体系与话语权, 向矿业界推广具有中国元素的新设备、新技术、新工艺、新方法, 联合制订相关标准与开采规范, 形成具有全球竞争力的矿业联合体。

REFERENCES

- [1] 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.
LI Xi-bing, HUANG Lin-qi, ZHOU Jian, et al. Review and prospect of mining technology in hard rock mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1828-1847.
- [2] 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.
XIE He-ping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 1-16.
- [3] 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(S1): 1-5.
GU De-sheng, LI Xi-bing. Science problems and research state of deep mining in metal and nonferrous mines[J]. Mining Research and Development, 2003, 23(S1): 1-5.
- [4] 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.
LI Xi-bing, ZHOU Jian, WANG Shao-feng, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6): 1236-1262.
- [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): 1-14.
WANG Yun-min. Opportunities and challenges to metal mine mining industry and the technical countermeasures[J]. Modern Mining, 2011(1): 1-14.
- [6] 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.
- [7] 樊俊, 郭源阳, 成永生. 国家重点研发计划“深地资源勘查开采”攻关目标与任务剖析[J]. 中国地质, 2019, 46(4): 919-926.
FAN Jun, GUO Yuan-yang, CHENG Yong-sheng. An introduction to Deep Resources Exploration and Mining, a special project of National Key R&D Program of China[J]. Geology in China, 2019, 46(4): 919-926.
- [8] 刘声远. 到小行星上去采矿[J]. 大自然探索, 2012(12): 22-27.
LIU Sheng-yuan. Mining asteroids[J]. Discovery of Nature, 2012(12): 22-27.
- [9] 李有观. 太空探地矿[J]. 科学(北京), 2006(11): 51.
LI You-guan. Space exploration of mineral resources[J]. Science(Beijing), 2006(11): 51.
- [10] 阳宁, 陈光国. 深海矿产资源开采技术的现状综述[J]. 矿山机械, 2010, 38(10): 4-9.
YANG Ning, CHEN Guang-guo. Status quo and development tendency of deep sea minerals mining technology[J]. Mining & Processing Equipment, 2010, 38(10): 4-9.
- [11] 蒋明镜, 肖俞, 刘芳. 深海能源土开采对海床稳定性的影响研究思路[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1412-1417.
JIANG Ming-jing, XIAO Yu, LIU Fang. Methodology for assessing seabed instability induced by exploitation of methane hydrate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1412-1417.
- [12] 金翔龙. 二十一世纪海洋开发利用与海洋经济发展的展望[J]. 科学中国人, 2006(11): 13-17.
JIN Xiang-long. The prospect of ocean exploitation and utilization and Marine economy development in the 21st century[J]. Scientific Chinese, 2006(11): 13-17.
- [13] 曹异生. 世界铜资源开发与我国海外办铜矿展望[J]. 中国金属通报, 2006(8): 5-10.
CAO Yi-sheng. The development of copper resources in the world and the prospect of China's overseas copper mines[J]. China Metal Bulletin, 2006(8): 5-10.
- [14] LEWICKI C, DIAMANDIS P, ANDERSON E, et al. Planetary resources—The asteroid mining company[J]. New Space, 2013, 1(2): 105-108.
- [15] 齐林居. SpaceX 星际飞船问世它能飞出太阳系吗? 人类星际航行有多难[EB/OL]. [2019-10-02]. <https://www.yidianzixun.com>.
QI Lin-ju. SpaceX is out. Can it fly beyond the solar system? How hard is it for humans to travel interstellar [EB/OL]. [2019-10-02]. <https://www.yidianzixun.com>.

- [16] PAPPALARDO J. New competition for lunar commercial mining[EB/OL]. [2020-07-31]. <https://www.popularmechanics.com>.
- [17] 周国庆,李瑞林,严康,等.月球采矿中月壤/岩力学问题的理论与试验方法[J].煤炭学报,2019,44(1):183-191.
ZHOU Guo-qing, LI Rui-lin, YAN Kang, et al. Theoretical and experimental methods for lunar regolith/rock related mechanical issues in lunar minerals mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 183-191.
- [18] POOL R. Deep space mine [lunar mining][J]. Engineering & Technology, 2013, 8(12): 63-67
- [19] RAGNARSDÓTTIR K V. Rare metals getting rarer[J]. Nature Geoscience, 2008, 1(11): 720-721.
- [20] 李夕兵,刘志祥,彭康,等.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, et al. Theory and practice of rock mechanics related to exploitation of undersea metal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1945-1953.
- [21] LODGE M. 国际海底管理局和深海海底采矿[EB/OL]. [2021-10-16]. <https://www.un.org/zh/chronicle/article/20657>.
LODGE M. The international seabed authority and deep ocean mining[EB/OL]. [2021-10-16]. <https://www.un.org/zh/chronicle/article/20657>.
- [22] 赵羿羽,曾晓光,郎舒妍.深海采矿系统现状及展望[J].船舶物资与市场,2016(6):39-41.
ZHAO Yi-yu, ZENG Xiao-guang, LANG Shu-yan. Current situation and prospect of deep sea mining system[J]. Marine Equipment/Materials & Marketing, 2016(6): 39-41.
- [23] 大公网.山东黄金探获国内最大金矿[J].黄金科学技术,2017(2):103.
DAGONGWANG. Shandong gold finds largest gold deposit in China[J]. Gold Science and Technology, 2017(2): 103.
- [24] 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):2364-2380.
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): 2364-2380.
- [25] 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.
- [26] 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): 2551-2563.
- [27] 袁亮.煤炭精准开采科学构想[J].煤炭学报,2017,42(1):1-7.
YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1-7.
- [28] LI Xi-bing, SHANG Xue-yi, MORALES-ESTEBAN A, et al. Identifying P phase arrival of weak events: The Akaike information criterion picking application based on the empirical mode decomposition[J]. Computers and Geosciences, 2017, 100: 57-66.
- [29] WANG Ze-wei, LI Xi-bing, ZHAO Da-peng, et al. Time-lapse seismic tomography of an underground mining zone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 107: 136-149.
- [30] HUANG Lin-qi, LI Jun, HAO Hong, et al. Micro-seismic event detection and location in underground mines by using convolutional neural networks (CNN) and deep learning[J]. Tunnelling and Underground Space Technology—Incorporating Trenchless Technology Research, 2018, 81: 265-276.
- [31] 李夕兵,陈江湛,马春德,等.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, et al. Recovery device for spatial layout of geological core. China, CN 201910355119.3[P]. 2019-08-02.
- [32] 马春德,刘泽霖,龙珊,等.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 Ze-lin, LONG Shan, et al. A spatial orientation positioning device for core in borehole and verification method of stress release method by over coring. China, 201810954917.3[P]. 2018-12-18.
- [33] 山东黄金集团有限公司,中南大学. T/CGA 020—2021.金矿微震实时监测技术规范[S].2020.

- Shandong Gold Group Co., Ltd., Central South University. T/CGA 020—2021. Technical specification for real-time microseismic monitoring of gold deposits[S]. 2020.
- [34] 中南大学, 山东黄金集团有限公司. T/CGA 026—2021. 金矿深部岩体地应力测量——钻孔岩芯声发射法[S]. 2020. Central South University, Shandong Gold Group Co., Ltd. T/CGA 026—2021. In-situ stress measurement of rock mass in deep mine—Acoustic emission method of borehole core[S]. 2020.
- [35] 山东黄金集团有限公司, 中南大学. T/CGA 027—202. 金矿岩爆倾向性评价——钻孔岩芯多指标综合法[S]. 2020. Shandong Gold Group Co., Ltd., Central South University. T/CGA 027—202. Evaluation of rockburst tendency of gold ore—Multi-index synthesis method of borehole core[S]. 2020.
- [36] DONG Long-jun, LI Xi-bing. A microseismic/acoustic emission source location method using arrival times of PS waves for unknown velocity system[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 9(10): 1843–1854.
- [37] LI Xi-bing, DONG Long-jun. Comparison of two methods in acoustic emission source location using four sensors without measuring sonic speed[J]. *Sensor Letters*, 2011, 9(5): 2025–2029.
- [38] 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.
- [39] WANG Shao-feng, LI Xi-bing, YAO Jin-rui, et al. 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.
- [40] 王少锋, 李夕兵, 宫凤强, 等. 深部硬岩截割特性与机械化破岩试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(8): 2772–2782.
WANG Shao-feng, LI Xi-bing, GONG Feng-qiang, et al. Breakage characteristics and mechanized mining experiment in deep hard rock[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(8): 2772–2782.
- [41] 李夕兵, 王少锋, 赵国彦, 等. 一种预切槽硬岩矿体旋转振动连续截割设备及其施工工艺. 湖南: CN105804743A[P]. 2016–07–27.
LI Xi-bing, WANG Shao-feng, ZHAO Guo-yan, et al. A kind of rotary vibration continuous cutting equipment and its construction technology for precut grooved hard rock orebody. Hunan: CN105804743A[P]. 2016–07–27.
- [42] WANG Shao-feng, SUN Li-cheng, HUANG Lin-qi, et al. Non-explosive mining and waste utilization for achieving green mining in underground hard rock mine in China[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(9): 1914–1928.
- [43] 李夕兵, 宫凤强, 王少锋, 等. 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, et al. Coupled static-dynamic loading mechanical mechanism and dynamic criterion of rockburst in deep hard rock mines [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(4): 708–723.
- [44] STENTZ A, OLLIS M, SCHEDING S, et al. Position measurement for automated mining machinery[C]// *Proceedings of the International Conference on Field and Service Robotics*. [S. l.]: [s. n.], 1999: 299–304.
- [45] LI Xi-bing, RUPERT G, SUMMERS D A, et al. Analysis of impact hammer rebound to estimate rock drillability[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2000, 33(1): 1–13.
- [46] 李夕兵, 刘冰, 姚金蕊, 等. 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): 1845–1865.
LI Xi-bing, LIU Bing, YAO Jin-rui, et al. Theory and practice of green mine backfill with whole phosphate waste[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(9): 1845–1865.
- [47] ALDRED J. 深海海底采矿的未来将于年内决定[EB/OL]. [2019–02–25]. <https://chinadialogueocean.net/6682-future-deep-seabed-mining/?lang=zh-hans>.
ALDRED J. The future of deep seabed mining will be decided this year[EB/OL]. [2019–02–25]. <https://chinadialogueocean.net/6682-future-deep-seabed-mining/?lang=zh-hans>.

Practice and thought on sustainable development of nonferrous metal mining

HUANG Lin-qi^{1,2}, CHEN Jiang-zhan^{1,2}, ZHOU Jian^{1,2}, YIN Tu-bing^{1,2}, DONG Long-jun^{1,2},
MA Chun-de^{1,2}, SHI Ying^{1,2}, LI Xi-bing^{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: With the layout and implementation of the national strategy of deep earth, deep sea and deep space, the sustainable development of nonferrous metal mining will have higher requirements in the near future. Based on the distribution and characteristics of precious non-ferrous metals in deep sea, deep earth and deep space, this paper systematically summarizes the present situation and prospect of the "Three Deep" mining of nonferrous metals in China and other countries, and puts forward that the sustainable development of non-ferrous metals in the future must take the road of accurate, continuous, intelligent and green mining. This paper introduces the work the author has done to realize the sustainable development of nonferrous metal mining, and gives some thoughts on the steady progress of the sustainable development of nonferrous metal mining in the future.

Key words: nonferrous metal mines; sustainable development; non-explosive continuous mining; intelligent mining; green mining

Foundation item: Projects(72088101, 51904335) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2021-07-15; **Accepted date:** 2021-10-27

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

(编辑 何学锋)