



Views & Comments

我国深部金属矿山绿色智能可持续发展关键工程科技战略

蔡美峰^{a,b}, 李鹏^{a,b}, 谭文辉^{a,b}, 任奋华^{a,b}^a School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China^b Key Laboratory of Efficient Mining and the Safety of Metal Mines (Ministry of Education of the People's Republic of China), University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

1. 引言

矿产资源是世界各国处于第一位的工业原料,对国民经济的发展和社会物质文明与科技进步有举足轻重的作用。经过多年持续高强度开发,我国浅部金属矿产资源逐渐减少或枯竭[1],金属矿产资源的开采正处于全面向深部推进阶段。目前,已有20多个地下金属矿山达到或超过1000 m的开采深度[2]。据统计,未来十年,我国三分之一以上的地下金属矿山的开采深度将超过1000 m,其中最大开采深度将达到2000~3000 m。随着勘探技术和装备的进步,我国未来在3000~5000 m深部找到一批大型金属矿床是完全可能的。因此,深部开采是我国金属矿产资源开发面临的最迫切问题,也是今后保证我国金属矿产资源可持续开发与供给的最主要途径。在此背景下,我们从前瞻性的角度提出了解决深部开采难题的关键工程科技战略。

2. 深部开采面临的关键难题

深部安全高效开采面临一系列工程挑战[3-5],其面临的关键难题主要来自以下几个方面:①高地应力。在深部高地应力作用下,采矿开挖将形成破坏性的地压活动,导致岩爆、塌方、冒顶、突水等开采动力灾害的发生[6],严重影响生产安全和正常作业。②岩性恶化。进入深部

后,岩体结构与力学特性会发生重大变化,给支护和后续开采安全带来很大负担,严重影响开采效率和效益。③高温环境。深部矿井的高温环境会使围岩的力学性能大大劣化,严重影响设备的安全运行、作业效率和工人身体健康,会造成不可预测的灾害和事故。④深井提升。随着开采深度的增加,矿石和各种物料的提升高度显著增加,造成提升难度和成本大幅增加。传统有绳提升技术不仅难以满足深部提升的要求,而且对生产安全构成潜在威胁。

3. 深部开采关键工程科技战略

3.1. 岩爆预测预报与防控技术

金属矿山岩爆是由采矿引发的一种动力灾害,是采矿工程中的主要灾害类型。岩爆预测、预报是一项世界级难题。认识和控制岩爆是矿山安全维护的首要任务。采矿开挖破坏了地层平衡状态,并在围岩中产生了扰动能量。当岩体中聚集的扰动能量达到很高水平,并且在岩体由于高应力作用出现破裂或遇到断层等情况下,能量突然释放,就可能形成岩爆[7]。这是对岩爆机理的准确认识。基于岩爆机理,岩爆预测应与开采过程紧密结合。根据未来的开采计划,采用数值模拟、数理统计等方法,定量计算出未来开采诱发扰动能量的大小、时间(开采时间)和在岩体中的空间分布状况及其随开采过程的变化规律。随后,借助地震学的知识(地震能量与震级的关系式),可以对

未来开采诱发岩爆的发展趋势及其“时间-空间-强度”规律做出理论上的预测[7]。同样基于岩爆的诱发机理,岩爆防控应主要从优化采矿方法、开采布局和开采顺序入手,减小在围岩中产生高岩应力集中和大的位移,减小和控制开采过程中扰动能量的聚集,从而减轻和控制岩爆的发生。同时,采取能吸收能量、防冲击的支护措施,阻止和减弱岩爆的冲击破坏作用。

3.2. 支护技术

地下金属矿的采矿方法,随开挖和支护方式不同,分为空场法、崩落法、充填法三类,其中充填法成本最高。各矿山主要根据矿石价值和采空区维护难度的不同,决定各自适用的采矿方法。但为了实现绿色采矿,控制岩层移动和地表沉陷,特别是进入深部开采后控制剧烈的地压活动,充填法将是多数矿山(包括铁矿)不得不选择的采矿方法。这是对传统采矿模式的重大变革。但是,开采价值和支护成本相平衡的原则仍需遵守。为了广泛应用充填法,必须对充填工艺和充填材料进行重大改革,大力降低充填成本。利用矿山固体废料的充填工艺是最具有普遍应用前景的技术方案。近年发展起来的全尾砂膏体充填工艺,可在低水泥耗量条件下获得高质量充填体,膏体强度均匀、充填采空区接顶率高,能有效控制地压活动和岩层移动。该技术代表了充填技术未来的发展方向。此外,胶凝材料在膏体充填成本中占很大比重。研究超细、高强、价廉、速凝充填新材料可有效降低充填成本。

3.3. 高温环境控制与降温技术

国内外常用的矿井降温技术包括非人工制冷和人工制冷两大类。非人工制冷降温技术主要包括矿井通风、热源隔离、岩层预冷、采空区充填等多种方法,其中矿井通风应用最为广泛。然而,矿井通风降温成本高、通风效率低。此外,对于热害较严重的矿井,非人工制冷降温技术难以满足降温要求,必须同时采用人工制冷降温措施。人工制冷降温技术目前在金属矿山广泛应用,主要包括水冷却系统和冰冷却系统。水冷却系统通过制冷机组制出冷水,再通过高低压换热器和空冷器,将通风系统输入井下的风流冷却后,送到工作面降温。该系统实际上就是空调技术在地下矿井的应用。冰冷却系统通过风力或水力将地面制出的粒状冰或泥状冰送至井下融冰池,利用工作面回水喷淋融冰,融冰后的冷水送至工作面,通过空冷器降温或采取喷雾降温。一般来说,非人工降温技术和人工降温技术都是被动式降温技术。工程实践表明,这两种降温技术不仅降温成本高,而且在深井中降温效果也不十分理想。

为了高效解决深井降温问题,必须发展主动式降温技术,重点在以下两个方向:①深井高温岩层隔热技术。深井高温环境主要是由高温岩层热辐射所造成,研发新型高效的隔热新材料、新技术、新工艺,对岩层高温热源进行隔离,在此基础上再采用人工制冷降温技术等,就能起到较明显的降温效果。②深井地热开发技术。地热本身是一种天然能源,而现有的降温技术是被动措施,将地热当成一种灾害在防治。如果在深部开采过程中,采用热交换技术对岩层中的地热资源进行开发利用,将深井采矿与深部地热开发相结合,就能大幅度抵消降温成本,从而为采矿深井降温开辟一条具有颠覆性的经济有效的技术途径。

3.4. 提升技术

提升是采矿过程中与凿岩开挖同等重要的一个环节。金属矿山广泛使用多绳摩擦式或缠绕式提升机。进入深部开采后,钢丝绳不断加长加粗,这不仅加大提升负荷,大大降低了有效提升能力,而且由于尾绳长度变化大,造成提升钢丝绳张力变化过大,导致断丝破坏,这成为制约摩擦式提升安全的主要因素。据国内外统计,摩擦式和缠绕式提升机单级最大提升高度分别只有1800 m和3000 m左右。更大的提升高度必须多级提升,从而使设备成本大大增加,提升效率大大降低。

当提升高度超过3000 m或4000 m后,有绳提升技术因钢丝绳而造成的大负荷、大惯量、大扭矩将是无法解决的问题。为此,必须研发无绳垂直提升技术,如直线电机驱动提升技术和磁悬浮驱动提升技术等。无绳垂直提升技术具有设备体积小、移动灵活、效率高、提升高度不受限制等优点,适合于深井提升。目前这方面的技术和装备都还处于初步设想阶段,需要今后更深入地进行创新研究和科学实验,才能研制出实用的技术和产品。建议我国今后要重点开展这类提升技术和装备的研发。

4. 绿色智能采矿模式

传统的浅部采矿模式和开采方法已不适合深部高应力场、高井温、岩体结构变化和复杂的地质条件。为了适应深部金属矿绿色智能开采的要求,提高深井自动化高效开采水平,必须对现有采矿模式及其工艺技术进行根本变革。

4.1. 精准切割采矿

传统的采矿掘进破岩方法是钻爆法。钻爆工艺对围岩稳固性造成破坏,威胁开采安全。而且这种方法将矿石、

废石一起采，大大增加提升的废石量和选矿作业的工作量。为了提高深井自动化精准高效开采水平，必须研究精准切割采矿的方法。

4.1.1. 机械连续切割掘进与采矿技术

采用机械掘进、机械凿岩的方法，以连续切割设备取代传统爆破采矿工艺进行采矿，切割空间因不需实施爆破而明显提高围岩稳固性。机械切割能准确地开采目标矿石，实施精准开采，使采矿损失率和矿石贫化率降到最低，从而大大减少提升的工作量和选矿的作业量。切割落矿、装载、运输工艺平行连续进行，为实现连续采矿，提高采矿效率，保证开采安全创造了条件。采矿机作业受到金属矿床形态多变和复杂地质条件及切割头的寿命和费用的限制，这是实施该技术需要解决的两个关键前沿问题。

4.1.2. 高压水射流破岩掘进与采矿技术

高压水射流技术是20世纪70年代发展起来的一种清洗、切割新技术。从高压喷嘴射出的高速水射流具有很大的能量，在目标靶上可产生巨大的冲击力，可用来切割岩石、破碎岩石等。高压水射流破碎和切割过程中，能自动排出废料，只需对使用后的水进行简单物理净化，就能实现对水的循环利用。目前，高压水射流破岩在软岩和中等硬岩工程中已经实现，在煤矿有广泛应用。但在破碎坚硬矿岩时，还存在水射流压力不足等问题，因而在金属矿山中的应用受到限制。为了解决硬岩破岩问题，高压水射流需向超高压大功率化方向发展。因此，需要进一步发展和改进超高压的水射流部件和设备，如超高压泵、旋转密封、耐磨喷嘴和高压管件等部件，为其在金属矿硬岩中的应用创造有利条件。

4.1.3. 激光破岩掘进与采矿技术

激光破岩是利用高能激光束产生的热量对岩石局部迅速加热，当温度足够高时，就会发生一系列复杂的物理化学反应，并随温度升高依次实现破碎、熔化和汽化三种破岩形式。采矿破岩只要实现破碎即可。当高能激光作用于岩石表面时，岩石局部迅速受热膨胀，导致局部热应力升高。当热应力高于岩石极限强度时，岩石就会发生热破碎，实现切割破岩[8]。此外，岩石表面的微裂缝和孔隙等使其极限强度降低，因而会加剧这种热破碎切割作用。

4.1.4. 等离子体破岩掘进与采矿技术

使用等离子体破岩时，需要首先向岩体内钻孔，然后将同轴爆破电极紧密地装入钻孔中，并在钻孔前端充满电解质。通过引爆触发器接通连接同轴爆破电极的储能电容

器组，在高电能的作用下，电解质很快地转变成高温、高压的等离子气体。高温、高压的等离子气体迅速膨胀形成强大的冲击波，导致类似于化学炸药产生的爆破效果[9]，产生的压力可超过2 GPa，这样高的压力足以破裂坚硬岩石。该技术的实施可极大改善作业环境，减少了传统爆破对围岩和环境的影响和破坏。

4.2. 无废开采

无废开采的目标是最大限度地减少废料的产出和排放，提高资源综合利用率，减轻或消除矿产资源开发对生态和环境的破坏。矿山无废开采模式遵从工业生态学的观点，以采矿活动为中心，将矿山生态环境、资源环境和经济环境联系起来形成一个有机的工业系统，以最小的排放量获取最大的资源量和经济效益。采矿活动结束后，通过最小的末端治理使矿山环境与生态环境融为一个整体。为了实现无废开采，应大力提高采选技术水平，大力降低矿石贫化率等，实现废料产出最小化，从源头上控制废石产出率。同时，尽可能提高选矿回收率，减少尾矿排放量，将矿石资源中由于选冶水平低而不能利用的成分减到最少。此外，加强综合回收，实现废弃物的资源化，提高废弃物的整体利用水平，努力实现矿山固体废弃物的零排放、零堆存。

4.3. 溶浸采矿

溶浸采矿是集采矿、选矿、冶炼为一体的技术，可分为原地钻孔溶浸、原地破碎溶浸和堆浸三大类。该技术在矿体中通过浸矿液直接回收金属元素，可以大幅度减少采矿、选矿、冶炼作业的工作量，降低生产成本，为深部低品位矿石回收提供了可行的途径[10]。与传统“采矿—选矿—冶炼”工艺相比，原地溶浸的成本可以节约30%以上，甚至达到50%，对深部矿产开采具有重要应用价值。此外，该工艺不产出废石、尾矿，无开挖扰动，对地面环境几乎无影响。这也是未来实现绿色开采技术的主要方向之一。溶浸采矿技术是一门边缘交叉学科，目前的基础理论还较薄弱，需要在散体渗流动力学、浸出过程中多因素强关联机制等方面进一步开展研究。特别是目前该工艺可回收的大宗金属品种太少，只能有效回收铀、铜和金等很少金属矿种，需大力研究更多金属矿种的浸出工艺和回收技术。

4.4. 地下采选一体化开采

在矿石提升地面之前，在井下进行预选和预富集，抛去大部分废石，可以明显降低矿石提升量和废石在地面的排放。对于深部开采，将矿石预选后在井下破碎、研磨成

矿浆，用管道水力输送至地表选矿厂。与其他运输方案相比，该工艺具有基建投资低、对地形条件适应性强、不占用或少占用土地等一系列优点，是一项有利于环境保护的技术。

将选矿厂建在井下，开采的矿石在地下进行选矿，然后直接向地面输送精矿。这可大量减少废石的提升量，是解决提升难题的一个重要途径。选矿产生的废石与尾矿留在井下用于采空区充填，实现就地利用，并减少排出地面后对生态环境造成的污染和破坏。此外，无需在地面建设选矿厂和尾矿库，省去了征地建厂建库和尾矿库管理的费用，消除了尾矿库引发各种自然灾害的根源。因此，这是充分发挥矿产资源绿色高效开发综合效益的重要举措。

4.5. 智能化无人采矿

智能化无人采矿是应对不断恶化的深部开采条件和环境条件、实现矿产资源开发安全高效最大化的必由之路。人工智能是新一轮科技革命和产业变革的重要驱动力量，加快人工智能和矿业开发工程科技的融合，实现矿产资源智能化无人开采，是21世纪矿业发展的重要方向和前瞻性目标，是实现我国金属矿产资源可持续开发的重要保障。

目前，国内外智能化无人矿山的建设仍处于初级阶段。在此阶段，无人采矿的核心技术仍然是传统采矿工艺和生产组织管理的自动化与智能化控制。这种智能化控制主要是通过现场或远程遥控来实现的。信息、通信和人工智能的进步，将推动无人采矿向以先进检测及监控系统、高速数字通信网络、互联网、物联网、5G、大数据、云计算、智能采矿设备与工艺等集成化为主要技术特征的高级无人矿山发展。处于高级阶段的无人采矿设备和控制系统应具有智能目标识别与感知、自主记忆、自主判断、自主决策、类似于智能大脑的功能，不需要通过外部遥控来实现。新一代高级无人采矿技术必将涉及采矿工艺及生产过程自身的变革。为了实现无人采矿从初级阶段向高级阶段过渡，对传统的采矿模式、技术、工艺和管理手段进行根本性的变革是完全必要的，其中包括开发和创新一系列具有颠覆性的技术和方法。

近年来，以杏山铁矿、三道庄钼矿为代表的几个矿山，在加速智能化采矿技术的研究与推广应用方面做了大量卓有成效的创新性工作，取得了巨大进展，极大地缩小了与国外的差距。但目前我国一批中小型金属矿山设备还比较落后，先进设备需要高价从国外进口，从而制约了设备的换代升级和先进采矿技术的推广应用。为此，国家和科研系统必须加大科技和经费投入，首先在自动化采矿装

备方面取得突破，尽早实现大型自动化装备国产化。这就能够为加速我国智能化采矿技术的推广应用创造可靠条件。

综上所述，采矿业是国民经济发展的保障性行业。中国是发展中国家，目前尚处于工业化和城镇化的快速发展阶段。因此，对金属矿产资源和金属矿产品的需求还会在一定时期内保持高位。未来矿产资源开发涉及绿色开采、深部开采、智能化采矿三大主题，其中深部开采是统领全局的主题。为了解决未来深部开采面临的一系列关键技术难题，必须广泛吸收各学科的高新技术，发展先进的、非传统的采矿新理论、新技术、新工艺，创造更高效率、更低成本、最少环境污染和最好安全条件的绿色智能采矿模式，提高金属矿产品产量和生产效率，从而保证我国矿产资源的有效供给及国民经济安全与可持续发展。

5. 结论

本文针对我国金属矿产资源深部开采现状和面临的主要难题，从岩爆预测与防控、深井支护、深井高温环境控制与降温治理、深井提升等方面提出了解决我国深部开采难题的关键工程科技发展战略。此外，提出了未来必须从精准切割采矿、无废开采、溶浸采矿、地下采选一体化开采及智能化无人采矿模式等方面对现有采矿模式及其工艺技术进行根本变革以适应深部金属矿绿色智能开采的要求。上述几个方面具有前瞻性的关键创新技术的集成，构成了我国金属矿深部开采创新技术体系的整体框架。

References

- [1] Cai M, Brown ET. Challenges in the mining and utilization of deep mineral resources. *Engineering* 2017;3:432-3.
- [2] Cai MF, Xue DL, Ren FH. Current status and development strategy of metal mines. *Chinese J Eng* 2020;41(4):417-26. Chinese.
- [3] He MC, Xie HP, Peng SP, Jiang YD. Study on rock mechanics in deep mining engineering. *Chinese J Rock Mech Eng* 2005;24(16):2803-13. Chinese.
- [4] Xie H, Gao F, Ju Y. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering. *Chinese J Rock Mech Eng* 2015;34(11):2161-78. Chinese.
- [5] Xie H. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory. *Adv Eng Sci* 2017;49(2):1-16. Chinese.
- [6] Li P, Cai MF, Guo QF, Miao SJ. Characteristics and implications of stress state in a gold mine in Ludong area, China. *Int J Miner Metall Mater* 2018;25:1363-72.
- [7] Cai M. Prediction and prevention of rockburst in metal mines—a case study of Sanshandao gold mine. *J Rock Mech Geotech Eng* 2016;8(2):204-11.
- [8] Hallada MR, Walter RF, Seiffert SL. High-power laser rock cutting and drilling in mining operations: initial feasibility tests. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng* 2001; 4184:590-3.
- [9] Hamelin M, Kitzinger F, Pronko S, Schofield G. Hard rock fragmentation with pulsed power. In: *Proceedings of Ninth IEEE International Pulsed Power Conference*; 1993 Jun 21-23; Albuquerque, NM, USA. New York: IEEE; 2002.
- [10] Yin S, Chen W, Chen X, Wang L. Bacterial-mediated recovery of copper from low-grade copper sulphide using acid-processed rice straw. *Bioresour Technol* 2019;288:121605.