

论当前地下金属资源开发的科学技术前沿

于润沧

(中国有色工程设计研究总院, 北京 100038)

[摘要] 随着岩石力学的发展、计算机在矿业领域的广泛应用以及多学科交叉的促进, 一向作为“技艺”的采矿学已开始进入科学领域。文章对地下金属资源开发的数控采矿环境、实现无废开采、海洋采矿、应对深井开采的岩爆威胁等科技前沿做了初步探讨, 阐明其对采矿学科发展的重要意义。

[关键词] 采矿; 金属资源; 数控采矿环境; 无废开采

[中图分类号] TD853/857/856 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)09-0008-04

地下金属资源开发, 以产值计在我国国民经济中虽然属于一个较小的行业, 但它对国民经济的发展和国家安全保障却具有极为重要的意义, 各行各业, 甚至包括高新技术产业的发展, 都离不开它的保障和支持。地下资源开发又是一个古老的传统产业。长期以来, 在矿产资源开发中, 主要是依据经验和类比的方法进行技术方案的决策, 因而采矿一直被认为是一种技艺而不属于科学。但是随着岩石力学的快速发展, 多学科的交叉和信息技术对传统产业的渗透, 许多非线性的、不确定性的现象及其发生机理逐步得到科学的解释, 其中的诸多科学问题逐步被人们所认知。矿块崩落法应用范围的扩大, 便是一个典型的例子。在上个世纪五六十年代以前, 这种不需要凿岩爆破而依靠地应力作用采矿的采矿方法, 只能用于松软破碎的矿岩; 七八十年代, 人们依靠岩石力学的研究成就, 运用高性能的计算机, 已经可以科学地确定矿岩的可崩性, 预测矿石崩落块度, 选择大型无轨设备, 把诞生于100多年前的这种古老的采矿方法的应用范围成功地扩大到坚硬稳固的矿岩, 初始崩落面积从数十平方米增加到1万多平方米。世界上最大的地下矿山智利的特尼恩特(Tennient)铜矿便经历了这样一

个过程。2001年11月我国召开了以“深部高应力下的资源开采与地下工程”为主题的香山科学会议, 这是进入21世纪的一件大事, 它标志着人们开始承认并认真探索地下矿产资源开发中的科学问题。在人们面前总是存在着许多未知的科学技术难题, 怎样认识当前地下金属资源开发中的科技前沿, 也是一个需要探讨的问题。

1 数控采矿环境

人类的每一代都会比上一代更加数字化^[1]。数控采矿环境, 最终实现矿业信息化, 已经成为从20世纪90年代开始的矿业最高追求。加拿大、瑞典、芬兰等不少矿业发达国家, 都在为实现地下金属资源开发这一宏伟目标进行着有组织的科技攻关, 并且已经取得了可喜的进展。

由于露天开采比地下开采有着较为优越的条件, 因此实现数控采矿环境更容易些, 发展也会更快些。随着实时矿山测量、全球定位系统实时导航和遥控、地理信息系统和先进耐用的触屏电脑的应用, 可使室内生成的矿床模型和采剥进度计划同现场实际操作联系起来, 形成动态管理和操作系统, 从而实现露天开采办公室化的梦想^[2]。

地下开采智能化的难度要大得多。由于 GPS 不能用于地下，开发实用的通信系统便成为一个关键。加拿大国际镍公司同 IMB 合作研制了一种基于有线电视和无线电发射技术相结合的地下通信系统，并在斯托比 (Stobie) 矿投入试用。这种带宽为 2.4 GHz 的功能很强的 CATV 网络与矿山各中段的无线电单元相结合，可传输操作每台设备的多频道视频信号。加拿大还设定了一个目标，预计 2050 年在北部边远地区建成第一座无人矿井，从萨德伯里 (Sudbury) 通过卫星操作地下所有设备，包括地下选矿厂的设备自动运行^[3]。这将使矿业发生革命性的变化。采矿方法已不再是现在的采矿方法，采矿工艺也不再是现有的采矿工艺，从事矿山生产的已不再是目前的矿工，而是由地质、工艺、机械、计算机软硬件、数学、人工智能等各领域专家组成的专家组。采矿学也将成为由更多学科交叉形成的一门崭新的学科。

任何一项新技术的生命，都是建立在更高的经济效益、社会效益和环境效益上的，数控采矿环境也不例外。数控采矿环境的效益主要表现在以下一些方面^[4]：第一，采矿人员在虚拟现实工作站操纵地下生产，彻底改变了矿工的安全条件和工作环境；第二，由于作业人员数量锐减，同时免掉了往返作业地点的路程，以及等待排除炮烟和粉尘的时间，工时利用率显著改善，因而劳动生产率得以极大提高，直接为企业创造更高的经济效益；第三，简化开拓系统和通风设施，因取消人行道而缩小巷道断面，从而减少基建期的投入；第四，数控采矿环境将改变采矿方法和采矿工艺，减少环境对采矿的影响和制约，增加矿床的经济价值，使地下开采变得更为有利。

2 实现无废和少废开采^[5]

地下金属资源开发过程所产生的废料——废石、尾矿、酸性水等，对环境造成严重危害。保护生态环境，实现无废或少废开采已成为矿业可持续发展的重大课题，日益为人们所关注。

各矿山废料产率不同，其物理化学性能也各有差异，直接影响废料利用和实现无废开采的可行性评估。目前有些中小型矿山，通过技术改造，采用多种手段已经实现了无废或少废开采，如南京铅锌银矿、吴县铜矿、瑯琊山铜矿等。日产 10 000 t 矿石的冬瓜山铜矿，从一开始便按照无废开采的原则

进行设计，尚属首创，现在正在建设之中。地下金属资源开发实现无废开采的主要难点在于尾矿的处理。有些尾矿可以作为二次资源加以开发利用，但多数情况下是用于采空区充填，全尾矿充填技术就是在这样的需求中发展起来的。然而这里派生出两个问题，一是那些金属价值不高的矿床，采用充填法开采经济上是不可行的；二是那些金属含量很低的矿床，尾矿产率高，难以全部用于充填。因此通过科技创新，攻克上述废料利用的诸多难点，是具有重要意义。

首先是开发无废或少废的回采工艺，原地浸出采矿便是一种。原美国矿业局将其称之为先进采矿系统 (AMS)^[6]，是一种无废、无污染、低成本的采矿方法。溶浸采矿是集综合采矿、选矿和湿法冶金为一体的矿产资源开发工艺，包括废石堆浸、筑坝堆浸和原地堆浸三种类型。溶浸采矿历史已很悠久，但 20 世纪 70 年代以来，堆浸 (槽浸) 一萃取一电积 (SX/EW) 技术才有了长足的发展，可浸金属品种不断增加，铜、铀、金、银等浸出法的产量已占很大比重。以铜为例，2000 年利用 SX/EW 法生产的铜已达 232×10^4 t，为矿产铜的 17.47%，精铜的 15.64%，其中智利 137.23×10^4 t，居世界第一位，美国 56.64×10^4 t，居世界第二位。我国铀矿溶浸采矿量所占比重，1999 年已达 80%。但原地浸出工艺因受诸多条件制约，发展缓慢。铜的氧化矿原地浸出，已有生产实践，铀的原地爆破浸出也已用于生产，但欲使原地浸出采矿得到更广泛的应用，还需要开展大量的科研工作，诸如矿石破碎工艺 (采用核爆破法破碎矿石也许具有诱人的前景) 的提高，适用菌种的培育，浸出工艺的改进，提高浸出率的研究，水文地质条件的探索，适用不同金属的高效萃取剂的开发等等，要使这一历史悠久的工艺，通过多学科交叉和高新技术的注入，焕发出时代的青春。

其次是强化资源的综合利用。这是提高企业经济效益的同时，减少尾矿产率的重要途径。发达国家对资源综合利用非常重视，有色金属矿床的资源综合利用率达到 76%~90%，有些矿山已经开始重视非金属矿物的综合利用。非金属矿物经过提纯、超细、改性和复合等现代工艺技术加工，可形成高附加值、高技术含量的非金属矿物新材料。相比之下，我国还存在较大的差距，根据对 1 845 个矿山的调查统计，资源综合利用率在 70% 以上的

矿山, 仅占2%, 资源综合利用率在50%以上的矿山, 还不到15%, 资源综合利用率低于25%的矿山, 占75%, 可见在这个领域是大有可为的。

此外还应推动废料资源化研究。这也是一个非常重要的领域。根据废料物理化学性质的不同, 通过对地理环境和经济效益的评估, 目前已有一些矿山将尾矿用作生产水泥、微晶玻璃、制釉面砖、普通砖等的原材料, 将废石用作建筑和铺路的材料。

更为重要的一点, 作为矿山工程设计技术创新的主要内容, 从设计开始就要按照无废开采进行设计。

3 海洋采矿^[7]

海洋是一个很大的矿产资源宝库。在大陆架上(水深0~200 m)开采砂锡、砂金、钛砂、钒砂、锆英石等矿物已有多年历史, 积累了不少经验。近30多年来, 不少国家已将海洋采矿的重点转向开采深海多金属结核的探索。据估计, 目前多金属结核的总储量为2 000~3 000 Gt, 其中工业储量约21 Gt, 其Mn, Ni, Cu, Co的平均品位分别为27.5%, 1.26%, 1.0%, 0.25%。一些工业发达国家为了取得深海采矿权, 争取作为先驱投资者开展了积极的竞争。1987年联合国海底筹委会批准前苏联、日本、法国、印度四国为先驱投资者, 我国也于1991年被批准为先驱投资者。先驱投资者有权在国际公海上取得 $15 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的“开辟区”, 进行优先开采。但也有一些国家, 如美国、德国、英国等不遵守《联合国海洋公约》, 而是自己制定临时措施和法规, 投入大量的人力物力, 进行调查、研究和试生产。

深海多金属结核开发涉及海洋地质, 海洋气象, 潜水机电设备, 海水腐蚀, 扬矿设施, 遥感、遥控、遥测技术, 海流和水波作用等诸多复杂的理论、技术和装备, 是一项高科技的系统工程, 难度很大。上述那些国家都围绕这一课题开展了大量的研究工作并取得了一定的成果。就深海多金属结核开采系统而言, 包括若干子系统, 首先是地勘系统, 要把海底矿产资源探清, 要了解结核分布规律、类型、形态、丰度、覆盖率、品位变化、赋存水深、海底地形及伴生沉积物类型和性质等。这方面的关键技术课题包括海底钻探设备、结核遥控取样、利用声学探测海深并绘制海底地形图, 利用光学探测确定结核分布特点并计算其丰度, 测定海底

矿岩物理力学参数等。其次是采矿系统。在众多的开采方案中, 目前看好水力管道提升矿石方案。该方案包括集矿装置, 负责采集、清洗、破碎多金属结核; 水下中间矿仓; 潜水电机—泵组及扬矿管道, 负责将结核提升到采矿船进入贮仓和分选系统, 最终产出精矿送往冶炼厂。深海多金属结核开采要依靠遥感、遥测、遥控技术解决采矿船集矿装置的定位及船向跟踪, 集矿系统的运转和自由移动, 扬矿管和采矿船连接方式的转换, 高压潜水泵及扬矿管道的运行和故障检测及排除, 船上计算机的集中控制和图像处理显示等。总之, 这是一个数字化程度很高的复杂系统。

深海采矿也面对保护海洋生态平衡和不受生产污染和破坏的问题, 如集矿装置周围沉积物重新浮起, 在其行走的轨道上大量底栖生物被摧毁; 采矿船排放海底沉积物引起海水表层水环境的改变; 分选产生的大量废渣, 不论在何处堆放, 都会对环境造成影响。因此海洋采矿的环境问题同样是必须研究的重要课题。

4 深井开采的岩爆威胁

矿井开采深度增加是一种自然趋势, 而地应力和地热都是随着开采深度的增加而增长的。高应力引发的岩爆和温度甚至超过人类生理极限的地热, 便成为开采深埋硬岩矿床时最严重的灾害, 也是对采矿工作者提出的巨大的技术挑战。征服地热的努力已经取得了良好的效果, 根据不同条件, 依靠加大通风量或建设制冷站, 通过热交换可使工作面的温度降低到安全规程的要求, 保证良好的作业环境。但是岩爆的研究工作难度更大, 进展也相对滞后。因此, 阐明岩爆发生的机理, 对其进行及时的监测、预报和治理, 在理论和实践上都具有重要意义。

金属矿山发生岩爆的历史比煤矿短, 首次岩爆被认为是1904年发生在美国密歇根州亚特兰大铜矿。该矿因岩爆严重破坏, 于1906年关闭。南非是当今世界上金属矿山受岩爆危害最多的地区, 岩爆事故从1908年的7起上升到1918年的233起。1975年一年南非31个金矿就发生了680起岩爆, 造成73人丧生。由于南非金矿的开采深度一般都已超过1 500 m, 最深者近4 000 m, 几乎无一例外都受岩爆危害, 里氏震级最高达5.1。尽管岩爆的危害已有一个世纪的历史, 采矿工作者对其也进行

了大量的研究工作，在机理探讨、监测、预报以及防治方面都取得了许多成就，但到目前为止，人们对岩爆的认识，特别是对机理的认识还不深刻，观点也很不一致，因而对岩爆及时准确预报仍然是有待进一步研究解决的技术难题。我国金属矿山开采深度，除个别矿山外目前都在800~1000 m以内，岩爆问题对我们来说还仅仅是个开端。我国现有金属矿山大多建于上个世纪五六十年代，目前已开采到中晚期，今后随着开采深度的不断增加，岩爆问题将日益突出，使地下开采面临严峻的挑战。这就要求我们吸取国外的经验，早日做好技术的应对和准备。

参考文献

[1] Negroponte N. 数字化生存[M]. 胡冰, 范海燕,

译. 第3版. 海口: 海南出版社, 1997

- [2] 于润沧. 采矿业发展知识经济的思考[J]. 中国工程科学, 2001, 3(1): 41
- [3] Pathak J, Udd J E. Hardrock underground mining in 21st century[A]. Innovative mine design for the 21st century[C]. Bawden & Archibald (eds), 1993 Balkema, Rotterdam, ISBN 90054103256
- [4] Scott A. Shuey. Remote Mining Technology [J]. Engineering and Mining Journal, 2002, (1):24~27
- [5] 彭怀生, 古德生, 董鸿翻. 矿床无废开采的规划与评价[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001
- [6] 李开文. 中国铀矿开采技术特点及发展水平[J]. 中国矿业, 2002, (1):23~27
- [7] 童光煦. 高等硬岩采矿学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995. 262~283

Recent Science and Technology Frontier for Exploitation of Underground Metal Resources

Yu Runcang

(China Nonferrous Engineering and Research Institute, Beijing 100038, China)

[Abstract] With the development of rockmechanics, extensive application of computer in mining area and promotion by intersection of multi-course, mining starts entering the science field, being regarded as skill always. This paper discussed the recent science and technology at the frontier for exploitation of underground metal resources; digital control of mining environment, wasteless mining, ocean mining and coping with threat of rockburst in deep mining, that are of great importance to the development of mining course.

[Key words] mining; metal resource; digital control of mining environment; wasteless mining