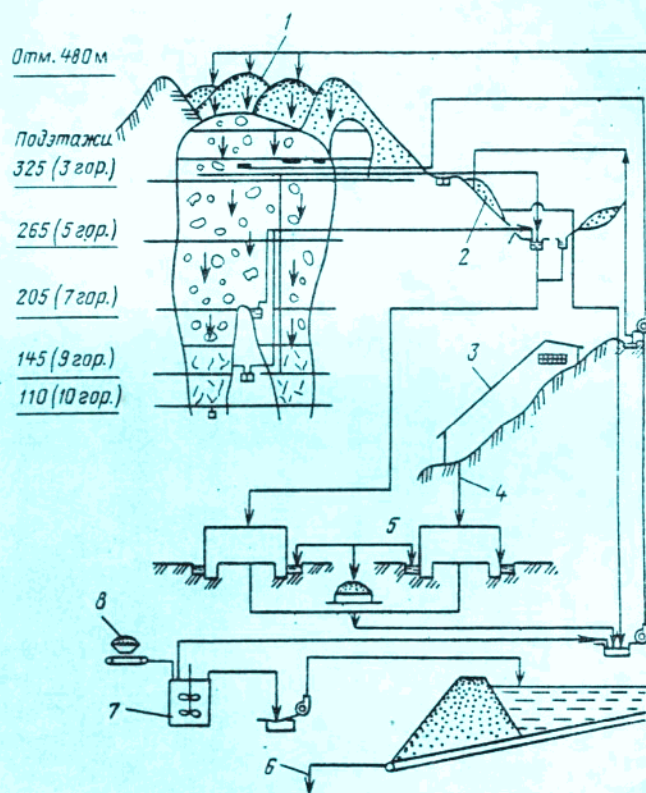


地浸矿山的建设与开采

В.Н.Мосинец 等著



《铀与金》编辑部

1992 年 7 月

地浸矿山的建设与开采

В.Н.Мосинец 等著

《铀与金》编辑部

1992年7月

地浸矿山的建设和开采

内容提要

本书叙述了在开采有色金属、稀有金属和放射性金属矿床时科技进步的主要方向；确定了在现代物理-化学、流体动力学概念基础上矿石地浸的最佳应用范围；介绍了苏联国内外应用地浸和堆浸的经验；列举了主要技术经济指标、矿床开拓和采准系统、采矿方法及矿石崩落方法；阐明了被浸矿石性质的评价方法；研究了矿山设计、有用矿物回收过程的强化、地下和环境保护措施的问题。

本书可供从事采掘工业的工程技术人员参考。

СТОРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ РУДНИКОВ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

作者：В.Н.Мосинец, Д.П.Лобанов, М.Н.Тедсеев, А.В.Абранов,
А.М.Капканщиков, Г.П.Арапов, В.К.Бубнов

出版：Москва «недр» 1987

译者：朱志祥、李素媛、刘士倜、王漱英

陈民信、李普洲、高鲁滨、胡长柏等

审校：王 鉴、李蕴峰等

责任编辑：戴孟彬

出版发行

《铀与金》编辑部

印 刷

地质矿产信息研究院

北京市新闻出版局 准印证号 3899-91899

前 言

在苏联共产党第二十七次代表大会的历史性决议中,确定了苏联在 1986~1990 年和到 2000 年期间社会和经济发展的基本方向,规定要大大提高国民经济发展速度,对生产结构进行巨大的改革,在加速科技进步的基础上强化生产。近期应该提高社会劳动生产率、降低材料消耗、能耗、资金和生产劳动量。这些任务的实现首先要依靠建立和大规模推广应用新的先进的工艺过程,以保证不仅是单个生产环节,而是整个部门能够得到必要的结构改革、综合机械化和自动化及先进的机器设备。这就要求提供和利用有色金属、稀有金属、塑料和各种合金的相应制成原理上全新的结构材料。

党的这些宏伟目标的顺利实施需要大力发展作为新材料生产、建立新技术和发展核能基础的有色、稀有和放射性矿石的原料基地。

提高资源的利用率取决于资源的深加工,即从每吨原料中获得最多的成品,生产出新型产品。在大力降低开采和初加工中资源的贫化损失也非常重要。最大限度地保持最高效的露天开采比重;尽可能也缩减地下开采,并根据矿山技术和地质条件以地下浸出法取而代之,采掘生产结构这样的巨大变化具有极为重要意义。除了采掘生产结构的巨大变化之外,投资政策亦应有大的改变:大力压缩新建矿山的基建投资,应将较多的资金投向生产中企业的技术改造和改建,以提高其生产能力,特别是对已具有必要的工业和社会设施的矿山进行技术改造。已经计算证明,应用地下浸出这样的新工艺不仅开采表外矿石,就是开采不合格矿石也是经济有效的。

近些年来,有色、稀有和放射性金属矿床的开采大为增加。矿床的地质形态学构造的复杂化、矿石中有用矿物含量的减少和被采矿床充水量的增高——所有这一切都会给今后有效开采有色、稀有和放射性金属矿石带来一系列客观困难。采用原产地矿石预破碎的地下浸出,由于降低下列费用可增加经济合理的开采深度 0.5~1 倍:

提升到地表的矿岩量不超过 15~20%,可减少其运输费;

可减少被浸留矿堆占用的采空区的闭坑费;

可减少地表矿石加工费和选矿尾矿贮存费;

✓ 由于应用了地下浸出法使较贫和极贫矿石有可能得以利用,可保证有用矿物的有效回收,储量可增加 1~2 倍。

在舒适劳动条件场所增多后,为较完全的机械化和自动化创造了条件,社会劳动生产率将会明显提高,为保护地下、水界和大气诸环境因素创造了良好生态条件,基建和经营费用将会大为降低。

与传统的露天采矿法和地下采矿法比较,地下浸出法工艺过程工序少。它省掉或节制了矿石装运和提升、采空区的封闭,由矿山到加工厂的矿石运输、矿石的破磨、尾矿的输送和贮存这样一些工序,不仅同期的基建费用,而且更新生产过程的经营费用也大为降低,同时也决定着新的采矿方法的先进社会方向。

铀和铜、金和钼,近些年来的铅和锌以及其他有用矿物矿床的地下浸出所积累的经验表明:目前至少在下列三个方面可能应用地下浸出^(12,18,32):

对报废矿山的地质资源进行补采;

对集中于矿床边缘部分的矿体、平衡表外矿量,单个独立的贮量不大的矿体可在进行

主要开采的同时平行浸出；

作为主要方法来开采矿床的表内矿量。

这些工艺问题研究的深度和广度的不同决定对问题提出的尖锐性。假如，机械化手段、矿体采准方法、钻孔爆破工艺从已知实践中做一定的修正后，即能顺利应用的话，那么，矿床开拓、采矿方法和浸出制度则要求提出原则上不同的问题，并予以解决。这些问题的解决要从现代发展有色金属、稀有金属和放射性金属矿物原料基地的特殊性中找出普遍性的课题加以系统研究。

目 录

前 言

第一章 有色金属、稀有金属和放射性金属矿石的采矿现状和特点.....	(1)
第1节 有色金属、稀有金属和放射性金属——现代社会技术进步的基础	(1)
第2节 开采有色金属、稀有金属和放射性金属矿床的矿山技术特点和地质形态等特性.....	(2)
第3节 开采有色金属、稀有金属和放射性金属时矿产的合理利用.....	(5)
第4节 采用地浸法处理有色金属、稀有金属和放射性金属矿石的科学技术基础和 技术经济基础.....	(7)
第二章 坚硬矿石浸出过程的物理-化学基础	(13)
第1节 从坚硬矿石中浸出金属的物理-化学基本原理	(14)
第2节 坚硬矿石渗滤浸出的一般规律	(15)
第3节 解决对流扩散问题	(17)
第4节 矿块的几何参数对有用组分的浸出速度和浸出率的影响	(20)
第三章 地浸和堆浸法对坚硬矿石适应性的矿山-地质条件和准则	(21)
第1节 确定能否采用地浸法回收有色金属和稀有金属时对矿石工业储量和工 艺性能的基本要求	(21)
第2节 适合于地浸法开采的金属矿床工业类型	(27)
第3节 评价宜于地浸法开采矿床的矿山-技术准则	(31)
第四章 开采坚硬矿石时地浸矿山的建设和生产的工艺基础	(34)
第1节 地浸矿山生产能力的确定	(34)
第2节 地浸产品液质量的稳定	(37)
第3节 地浸方法和地下开采方法的综合应用	(39)
第4节 地浸法开采矿床的开拓方式: 基本原则和定义	(40)
第5节 地浸法开采坚硬矿石矿床的采准工作: 基本定义和概念及对采准工作 的要求	(44)
第6节 保证矿山采准矿量和待浸矿量的标准	(45)
第7节 地浸法开采矿床时资源保护和环境污染预防	(46)
第五章 金属矿床的溶浸采矿方法	(50)
第1节 地下和地表浸出采矿方法的分类	(50)
第2节 采准工作	(53)
第3节 地表钻孔采矿法 (第Ⅰ类).....	(58)
第4节 含地下采矿工程要素的采矿法 (第Ⅱ类).....	(61)
第5节 含露天采矿工程要素的采矿法 (第Ⅲ类).....	(74)
第六章 矿石地浸和堆浸的辅助工艺	(77)
第1节 补偿空间的形成	(77)
第2节 地下浸出矿石准备的钻孔工作	(82)
第3节 在破碎矿岩中掘进巷道	(84)
第4节 在破碎矿岩中打钻孔	(85)

第5节	堆浸时的矿石筑堆	(88)
第6节	矿石浸出的劳动保护	(90)
第七章	地浸和堆浸时矿石达到给定破碎粒度指数的物理基础	(93)
第1节	岩石爆破作用的物理基础	(93)
第2节	岩石破坏机制的一般概念	(94)
第3节	深挤压介质中岩石破坏的特性	(103)
第4节	准备地下浸出的矿石工艺特点	(108)
第5节	地浸中采用液体炸药的物理原理	(112)
第6节	根据浸出过程的矿石中有用组分的品位确定粒度组成: 考虑有用组分按粒级分布	(113)
第7节	评价被浸矿石的粒度组成	(115)
第8节	评价矿块形状对浸出率的影响	(120)
第9节	对地浸和堆浸法留矿结构的研究	(121)
第八章	渗滤浸出中溶液运动的基本规律	(124)
第1节	不含水粗碎屑岩中溶液的运动	(124)
第2节	不饱和含水破碎岩石渗滤浸出过程的流体动力学	(126)
第3节	确立地浸和堆浸的最佳喷淋制度和组织工作	(133)
第九章	强化浸出过程	(135)
第1节	强化浸出过程的方法分类	(135)
第2节	物理方法	(136)
第3节	化学方法	(139)
第4节	机械方法	(139)
第十章	地浸矿山设计的科学基础与工艺规范	(147)
第1节	设计内容、设计规程和阶段	(147)
第2节	地浸企业矿山总体设计主要原始资料目录	(148)
第3节	在地浸矿山设计、施工和投产之前或同时并进的科研工作	(149)
第4节	地质部分设计	(151)
第5节	采矿部分设计	(152)
第6节	矿山机电部分设计与矿山基建工作	(154)
第7节	工艺部分设计	(155)
第8节	劳动组织与生产管理	(155)
第9节	环境保护措施	(156)
第10节	矿床开拓与采准特点	(157)
第十一章	地浸和堆浸法应用经验	(158)
第1节	矿床勘探中的地浸经验	(158)
第2节	应用地浸法对报废矿山储量进行补采的经验	(161)
第3节	在地下采矿法开采矿床中应用地浸和堆浸方法的经验	(174)
第4节	在开采新矿床中应用地浸和堆浸方法的经验	(179)
结 语		(182)
参考文献		(184)
编后记		(187)

第一章 有色金属、稀有金属和放射性金属矿石的采矿现状和特点

第1节 有色金属、稀有金属和放射性金属—— 现代社会科学技术进步的基础

在现代科技条件下生产力的迅猛发展要求能源原料的开采量比其他有用矿物的开采量超前增长，这是能源超前生产和需求与人口增长和国民总产量总增长速度之间应遵循的客观存在的规律^[39,42]。因此提高社会生产效率的第一必需条件是由开采和消费有机燃料过渡到开采和消费核燃料以便大幅度减少开采燃料资源的费用，而核燃料的单位发热量是最优质有机燃料的200万倍。

因此研究和应用开采放射性矿石的新工艺过程是科学技术进步最重要的任务之一。核能源的发展大幅度降低了有机燃料资源的生产和消费，同时要求有色金属、稀有金属和放射性金属采矿必须飞速发展，因为这些金属广泛用于核反应堆建设和核动力工程的有关部分以及现代生产的其他先进部门。

由于工业生产的飞速发展，对各种矿物原料的需求日益增长，世界有用矿物的产量每10年至15年就翻一番。仅仅最近25~30年就从矿藏中采出150亿吨铁矿石、700亿吨煤、250亿吨石油、12万亿立方米天然气、数十亿吨矿物肥料和建筑材料，回收数千万吨铜、铅、锌、铝，几十万吨其他有色金属和稀有金属，几百吨金和许多其他有用矿物。其中一部分只是在最近几年才开始满足新技术的需求的^[39]。

二十世纪的最后十几年，为满足世界工业生产日益增长的需求，将开采290~300亿吨金属、约2300亿吨燃料、6450~6500亿吨非金属有用矿物，也就是说，总共要开采大约9000~9100亿吨矿物原料^[39,42]。为了开采这些矿物原料，在这十几年还需要完成约9500亿立方米的采矿基建、采矿准备和岩石剥离工作量。如果说目前工业发达国家的采矿产值占国民总产值的5~6%，那么考虑到今后生产的增长、采矿技术和矿山地质条件的复杂化和矿石中有用矿物品位的下降，这一比重将增加到12~15%，这一点将在这些国家的总经济水平中明显地表现出来。因此，不断提高采矿生产效率、降低矿石损失和贫化率、加速采矿的科技进步是国家在开采有用矿物中经济发展最重要的因素。

苏联在1986~1990年和2000年以前的期间，经济和社会发展的主要方向为：铝增产15~20%，铜20~25%，镍和钴不低于23%，锌、铅、钛、镁、贵金属以及钨精矿和钼精矿、铌和其他制造合金的元素都要增加产量。

在2000年以前生产这样大量的金属将需要大量的物质资源和劳务资源。正如分析所指出，在这种情况下，金属的生产、消费和世界市场价格在极大程度上既取决于对该金属的需求量，也取决于其现有的探明储量。目前世界市场的有色金属价格为每吨800美元、稀有和放射性金属为10万美元，每克贵金属达数十美元。在这种情况下，金属价格取决于新技术的应用水平，而这又制约了金属的生产量和探明储量：当生产量达到足以满足需求水平时，金属价格下跌至该元素的最低值（图1-1），例如铁、硫、磷酸盐，而当金属

在矿藏中的储量有限时，该金属的价格就很高（图 1-2）。当然，在这种情况下不应排除一定的行情波动，而行情波动既与世界资本主义市场的通货膨胀有关，也与因某种金属不能满足市场需求而引起的价格临时上涨有联系。例如根据铀和钼的短期合同按高价销售，以及由于电工技术工业飞速发展而销售的合同都有这种情况。具有这种特征的还有某些稀有金属，由于这些金属应用的范围还不广，其价格与预测的比较是偏低的。但是，总的客观规律证明，有用矿物的探明储量增加，该金属的价格随之下跌。

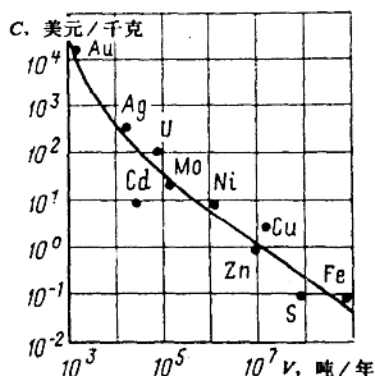


图 1-1 金属价格与其世界生产量的关系

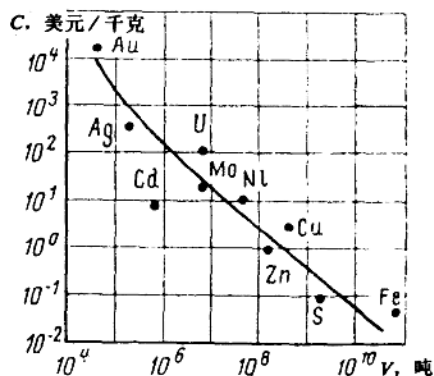


图 1-2 金属价格与其探明的世界储量的关系

因此，一方面有色金属、稀有金属和放射性金属的生产和消费的规模越来越大，另一方面由于有用矿物开采量大和探明储量的有限而促使金属本来就高的价格不断上涨，这就要求采用最先进的方法回收有用矿物使矿产资源的利用率越来越高，而其中的一种方法就是矿石地下浸出法。矿石地下浸出法的应用领域的拓宽，其工艺过程的组成及其参数的最佳化不仅能使有色金属、稀有金属和放射性金属矿石的探明储量的利用率提高数倍，而且由于能开采贫矿石、极贫矿石、平衡表外矿石、盲矿体及其边缘矿石会使这些金属的储量大增。

第 2 节 开采有色金属、稀有金属和放射性金属矿床的 矿山技术特点和地质形态学特征

开采有色金属、稀有金属和放射性金属矿床的重要特点，除了矿石的有用矿物品位不断降低以外，还有：由于金属集中在形态越来越复杂的矿体中而引起的储量结构的变化以及有用组分在矿体本身中多样性的复杂分布。

有色金属、稀有金属和放射性金属开采条件的动态变化可用放射性矿石开采的发展情况作为例子来说明。在采铀的最早阶段，主要铀矿资源是热液脉状矿床，其铀品位为 0.3 ~ 2.5%，平均铀品位大于 1%。这些矿床为资本主义世界提供了达 92% 的铀。南非的含金砾岩和加拿大的含铀砾岩的作用曾急剧增长。在 1955 年这种类型矿床的铀储量占资本主义世界总储量的 75%，沉积岩的铀储量占 15%，而脉状矿床的铀储量降到 10%。在 60 年代铀砾岩和砂岩的铀储量达 90%，从中开采的铀占 80%，而火成岩矿床（伟晶岩、

砂卡岩、热液)的铀储量为10%，采出铀占20%。被开采矿床的矿石中铀平均品位约为0.3%，砂岩和砾岩矿床的铀品位平均为0.12%，火成岩矿床达1.0%。在美国开采的铀矿石平均品位从1966年的0.23%降至1976年的0.15%，1981年又下降到0.118~0.12%。目前美国铀矿石储量中几乎80%的矿床铀品位低于0.07%，而已探明的矿石中平均铀品位为0.075% (表1-1)。

表 1-1

矿石中 铀品位。 %	美国已探明铀资源				铀价格 美元/千克
	矿 石 量		铀 量		
	亿吨	%	万吨	%	
0.2~0.1	1.03	2.8	20.4	20.0	33.0
0.1~0.07	5.97	16.5	38.1	37.6	33.0~66.0
0.07~0.06	11.53	31.7	26.4	26.0	66.0~110.0
<0.06	11.76	49.0	16.7	16.4	110~221
总 计	36.29	100.0	101.60	100.0	—

对于铀的世界储量来说，矿石中铀平均品位也有类似的下降情况 (表1-2)。

分析表1-2数据表明，除了储量占20%、开采铀量占6~10%的脉状和网脉状矿床的矿石中平均铀品位约为1%以外，占世界采铀量90~95%的其他矿石中平均铀品位只有0.086%。研究矿石中铀的分布特性表明，铀品位与矿石量之间的关系基本近似对数正态分布：铀品位下降到十分之一，矿石量大约增加到三百倍。因此绝大部分铀储量集中于品位极低的矿石和岩石中，例如集中在铀品位为0.003~0.006%的片岩中，占80~90%的世界铀储量是贫矿石和极贫矿石这一事实也就决定了采用原地地下浸出法采铀具有广阔的前景。在进行地浸时要寻找相应的溶剂和能加强铀转入液相的过程工艺条件。

表 1-2

矿床类型	储量所占比重 %	平均品位，%	国家和地区
砂岩	35	0.12	美国、尼日利亚、阿根廷、加蓬
脉状和网脉状	20	1.0	加拿大、澳大利亚、美国、法国
石英砾岩	15	0.12	加拿大、南非、澳大利亚
火成岩、变质岩和火山岩中 浸染矿石	7.0	0.06	加拿大、南非、西南非洲 格陵兰
灰结砾岩、片岩、磷块岩 中铀矿石	23.0	0.02	美国、瑞典、澳大利亚 巴西

与铀矿床一样，工业矿床的复杂化对有色金属和稀有金属也是有特征的，这些金属储量的大部分越来越集中在结构复杂的较贫矿床中。例如，集中在WO₃品位为0.2~0.25%的砂卡岩矿床中的世界钨储量⁽⁵¹⁾达60%，开采这种矿床时金属损失率5~15%，贫化率10~30% (表1-3)。

在被开采的钨矿床中主要是厚度为0.5~0.8米的矿脉。矿脉沿走向的长度在数百米至2千米之间，沿倾向的长度70~700米。矿体的倾角经常是急倾斜的。矿石中除了钨以外，还含有锡、铋、钼、铜等伴生组分，因此开采主要组分的费用相当低。

澳大利亚镍矿床也类似上述情况，集中于较贫矿石中，其 75% 的矿石储量集中在较贫的浸染矿石中，镍品位为 0.58%，而储量为 25% 的硅酸盐和硫化矿富矿石的镍品位达 1.57~2.17%，因此金属的总回收率达到了 70%。

开采的有色金属、稀有金属和放射性金属矿石的有用组分品位下降是因为在富矿床日益枯竭的同时，为了满足对矿物原料迅速增长的需求，开采的矿床越来越贫。例如，世界所有铜矿床的矿石平均品位由 1% 下降至 0.5%。这一时期苏联铅、锌、铜、钼、锡矿石和其他金属矿石的品位每年平均降低 2~3%；兹良诺夫斯克（Зыряновск）、列宁诺戈尔斯克（Лениногорск）、哲兹卡兹干（Джезказган）等采冶联合企业的商品矿石中铜、铅、锌品位每年平均降低 3%。

表 1-3

参 数	矿 床			
	脉状	砂卡岩	网脉状	砂岩
矿床储量:				
矿石, 万吨	50~1000	100~10000	2000~20000	5~50
WO_3 , 万吨	0.5~7	1~20	3~25	0.03~1
矿石中 WO_3 品位, %	0.5~4	0.2~2.5	0.1~0.3	0.1~0.5
矿床所占比重:				
按开采量, %	36.0	60	3	1
按储量, %	26	65	8	1
矿山年生产能力, 万吨矿石	5~50	10~500	50~1000	小于 5
损失率, %	7~15	5~15	2~5	2~5
贫化率, %	15~50	10~30	2~5	2~5
精矿中 WO_3 回收率, %	60~80	75~90	60~70	60~70

在矿石金属品位不断下降的条件下，要得到所需的金属量就需要不断增加矿石的开采量。因此，目前在每年金属采出量的平均增长速度为 3~5% 的情况下，矿岩石的采出量每 10~12 年就要翻一番。例如，科拉半岛矿床在 1950~1980 年期间矿岩石的开采量增加了 66 倍，矿石增加了 31 倍，而生产的自然形态的商品仅增加了 26 倍。1950 年为了生产 1 吨产品，需要开采 3.2 吨矿岩石，其中 2.2 吨矿石；而 1980 年则需相应地开采 7.6 吨和 2.6 吨。

但是，如果用地浸矿石和堆浸矿石的方法代替地下开采和露天开采，矿岩石开采量就会降低到几十分之一和几百分之一。地浸和堆浸由于在溶剂选择适当时浸出过程本身具有选择性，甚至能开采地质形态结构最复杂的贫矿石。

为了得到给定的金属量，除了矿石中有用组分品位降低使矿岩石的开采量增加外，矿床开采的矿山地质条件本身也恶化很多：开采深度加深，岩石硬度增大，涌水量、温度和地压增加。这就需要采用越来越复杂的工艺方案进行开采。由于上述原因，最近三四十年所采用的矿山设备费用提高了 2~3 倍，而劳务费提高了 9~11 倍，从而使矿物原料的开采费也不断增长。上述采矿技术条件的变化对矿石地下浸出的影响则不大明显，而其中的一系列变化简直是有效进行浸出工艺过程所必需的，如浸水性、高温。由此看来，在复杂化的矿山技术条件下，采用矿石地下浸出法是降低矿物原料开采费的捷径。

第3节 开采有色金属、稀有金属和放射性金属时矿产的合理利用

开采有色金属、稀有金属和放射性金属矿床时减少矿石损失和降低贫化率是采矿工业重要的现代经济问题之一。不合理的矿石损失和贫化给苏联国民经济带来无可挽回的损失。根据苏联黑色冶金工业部和有色冶金工业部的资料，开采和加工矿石时有用矿物总损失率为25~30%。因此，可以认为地浸开采有色金属、稀有金属和放射性金属的总回收率达到75~80%水平和随后从溶液中提取金属完全可以保证地浸法对地下开采和露天开采矿石的竞争能力。如果再考虑地浸法所具有的能减少有用矿物损失、能以明显低的采矿准备工作费用开采越来越贫的矿石这些优点，则地浸法容许的总回收率可降至65~72%。解决降低矿石损失和贫化的一般问题的重要性（其中也包括地浸法的损失和贫化），甚至远远超过解决提高开采的劳动生产率的问题：如果说降低1%损失率会使成品价格降低5%，而降低1%贫化率则会使成品价格降低2%，那么，劳动生产率提高1%则总共只能使最终成品的价格降低0.2%。由此看来，由于地浸法在选择性地从矿石中回收金属时可开采全部矿体或矿带，因此地浸法可减少矿石损失和降低贫化率，这一点是有色金属、稀有金属和放射性金属矿床开采中科技进步的最重要因素之一。

由于采用生产率越来越高的采矿法、分采水平降低、由采矿计划经济指标优先转向定量指标以及企业职工在经济上对降低损失率缺乏兴趣，用传统的采矿方法开采有色金属、稀有金属和放射性金属矿石所遇到的高损失率有进一步增加的趋势。特别是有色金属和稀有金属矿山的损失率更高，其中包括开采富矿的矿山。例如，哲兹卡兹干铜矿仅在最近15年的富矿损失率就从16%增加到25%，而在矿体最厚地段达40%。在特尔内阿乌兹（Тырныауз）联合企业的“钼”矿山损失率达12~14%。

总的来说，开采时矿石的损失取决于矿体形态、开采方法和回采空间参数与矿体或矿带参数之间的对应关系。地下开采形态简单、规模较大的铜矿床时，损失率达10~13%；地下开采较复杂的铅锌矿床时的损失率为12~16%；而地下开采形态最为复杂的汞矿床、稀有金属矿床、金矿床时的损失率可达25~30%。

降低矿石损失可大幅度减少为补偿这些损失而建新矿山的投资，减少占地面积，减少矿泥、废矿、矿坑水对环境的污染。因此，研究和应用旨在降低矿石损失的更为先进的采矿新方法和新工艺过程（其中包括地下浸出法）是提高整个采矿工业生产效率和最重要任务之一。

在解决这些任务中，降低有用矿物的贫化率的重要意义也是不小的。形态复杂的矿体的含矿系数在不断下降，开采形态越来越复杂的矿体会导致贫化率的提高，当稀有金属矿床的含矿系数为0.4~0.5时，贫化率可达40~50%（图1-3）。当开采形态简单的铁矿床时，贫化率为5~6%，开采较为复杂的铜矿床的贫化率为7~8%，开采更为复杂的铅锌矿床为18~20%，钨钼矿床为26~27%。开采结构复杂、以含矿系数低为特征的稀有金属和放射性金属矿床的贫化率特别高，例如，开采镭矿石的贫化率达25~30%，汞矿石为45~50%。在回采锡、钨、铅、锌等矿床的脉状薄矿体时，在崩矿和出矿过程中，混

人的围岩量经常超过崩落的脉矿量的1~2倍。

和矿石损失率一样，矿石贫化率给国民经济也带来巨大经济损失。除了增加出矿、运输、加工和废石、选矿尾矿堆置及尾矿坝、废石场随后复垦等各种费用外，矿石贫化率的提高还伴随商品矿石中 useful 组分品位的降低。这会使选矿过程中或冶金处理过程中有用组分的回收率大幅度下降，因而造成金属的额外损失。例如，当贫化率只有10%时，选别铜矿、多金属矿和铋矿的回收率要减少1.5~3%；选别铁矿，减少5~7%。提高矿石的有用组分品位伴随着加工过程中回收率的提高（图1-4）和加工费用的降低，这从美国加工铀矿的水冶厂的生产实践可明显地看出（表1-4）：当矿石铀品位提高1.5倍时，铀的回收率提高1.5%以上，1千克 U_3O_8 的加工费降低几乎一半。

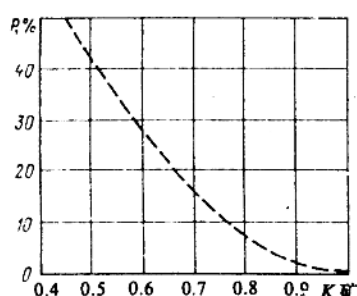


图 1-3 矿石贫化率与含矿系数的关系

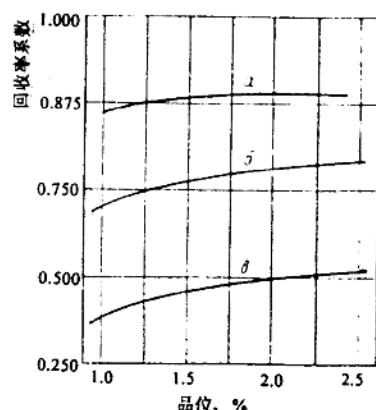


图 1-4 金属回收率与原矿品位的关系

a—铅矿；b—铜矿；c—镍矿

这样看来，降低矿石损失和贫化率是合理利用矿产的最重要的现代经济和生态问题之一。因此，近年来苏联采取了一系列组织措施和技术措施，以减少矿石损失和降低贫化率。

表 1-4

矿石品位 %	铀回收率 %	尾渣铀品位 %	加 工 费	
			矿石, 美元/吨	浓缩物中铀, 美元/千克
0.100	94.4	0.0056	3.30	3.90
0.125	95.0	0.0062	3.35	3.10
0.150	95.4	0.0069	3.40	2.60
0.200	95.9	0.0082	3.49	2.00
0.250	96.2	0.0095	3.58	1.70

减少有色金属、稀有金属和放射性金属矿石损失的最有前途的方向之一是采用地下浸出法。经验表明，地下浸出法不仅能减少矿石损失，而且由于能浸出矿化不合格矿晕，可大幅度增加矿石总储量。在这种情况下，浸出过程完全不会将贫化岩石浸出很多，因为实践表明，总的来说，该过程是有选择性的。

分析开采有色金属、稀有金属和放射性金属矿石的科技进步的主要方面可以证明，开

采大而贫的矿床或结构复杂的富矿，矿石损失大，贫化率高，需要在扩大原地地下浸出矿石的应用范围的基础上提高金属回收率。用这种完全新的采矿工艺过程代替传统的机械采矿工艺开采金属，可大幅度增加有用矿物的探明储量，从而从物理、生态或经济范围方面估量有可能使储量延缓枯竭；在这种情况下，甚至在开采矿床的深度不断加深的条件下，既有可能节省开采金属的投资，又有可能使生产费用大为降低。

第4节 采用地浸法处理有色金属、稀有金属和放射性金属 矿石的科学技术基础和技术经济基础

现代采矿工业发展的最重要特点是，无论露天开采还是地下开采，采矿工程的深度日益加深。目前地下开采稀有金属矿床时的开采深度约为 500 米^[13]，锡矿和建材达 600 米，钼矿为 1000 米，铁矿和铜矿 1200 米，煤矿 1400 米，镍矿和多金属矿 2300 米，金矿床达 3500 米。开采深度下降的平均速度为 10~25 米/年。在不久的将来，顿巴斯的开采深度将下降到 1000 米，克里夫巴斯（Кривбасс）将下降到 1200~1500 米，远期将达 2000 米。在开采有色金属矿石方面，诺里尔斯克（Норильск）矿冶联合企业的“Таймырский”和“Скалистый”两个矿山的开采深度在最近将达 1600~2000 米。目前联邦德国煤矿的深度已达 1200 米，南非达 4500~5000 米。开发到这样的深度需要解决一系列社会经济问题及科学技术问题，才能决定开发的合理性。

开采深度增加会使矿山的开采条件恶化：温度升高，气体析出增多，矿山压力急剧增长，冲击地压的危险增加。在这种条件下特别需要遵守在很深处进行采矿工作的共同规章：保持采矿工程前沿的直线性，保证矿体的最低可碎性，不留受压大或压力不均匀的矿柱，采用区域和局部排矿。在这种条件下，特别需要进一步完善采矿工程的总工艺，用完全新的工艺过程代替传统的机械开采工艺，其中的一种新工艺就是原产状矿体的地下浸出。

传统方法的开采成本随深度加深而增加，在恶化的矿山技术条件下劳动生产率降低，这两个因素支配着改用地浸的必要性。随着开采深度的增加，有用矿物开采成本增加的主要因素之一是掘进和支护巷道的费用增加了，因为随着深度的加深，不仅巷道长度和断面增加，而且巷道的掘进、重新支护和维修劳动量增大的费用都增加了。例如，克里夫巴斯在 1500 米以下巷道的掘进和维护成本增加了 30~35%，顿巴斯从 600 米增加到 1200 米，单位投资费增加了 20~25%，实际上每加深 100 米，仅由于支护成本的增加投资费就增加 4~5%。联邦德国采煤深度从 700 米增加到 1443 米，巷道断面从 17 米²增加到 25 米²，而支护物料增加到 34 千克/米。苏联煤炭工业部的矿井平均每年巷道总长度约 20% 要进行维修，而深矿井则增加到 65%，工作量从 530 人·班/千米提高到 2100 人·班/千米。总的来说，随着开采深度的增加，采矿工人的劳动生产率显著下降。例如，苏联煤矿在平均深度为 400~500 米的劳动生产率为 58 吨/（人·月），而深井的劳动生产率平均降至 44 吨/（人·月），即 600~700 米处为 51.7 吨/（人·月），700~800 米处为 44.1 吨/（人·月），800 米以下为 37.9 吨/（人·月）。实际上，深度每增加 100 米，劳动生产率就降低 10~12%。在这种情况下，由于通风和井下空气调节的费

用很高，投资费显著增加。例如，在克里夫巴斯，在其他条件相同时，开采深度每增加 100 米，投资费就提高 5~6%。在顿巴斯，近年来投资费增加了 50~100%，达到每吨设计能力为 100 卢布，像克里夫巴斯一样，在顿巴斯每增加 100 米，投资费也增加 5~6%。

特别是花在通风和空气冷却上的费用，随深度增加增长得更快。例如，赞比亚的明多拉（Миндолла）矿山在 1536 米深部，当生产能力为 320 万吨/年、岩石温度为 51.3℃ 时，空气用量为 1010 米³/秒。在这种情况下，光是通风和空气调节所耗总电能就达 30~35 千瓦小时/吨。南非每年耗在通风和空气调节的电能增长率约为 20%，与开采 15~18 米/年的下降速度成正比。由于上述情况，开采深度每增加 100 米，采矿成本就增长 8~10%。例如，在克里夫巴斯，当开采深度为 500~1000 米时，采矿成本为 0.5 卢布/吨；1000~1500 米时，成本增加到 0.7~1.1 卢布/吨；而深度超过 1500 米时，成本达 2 卢布/吨。顿巴斯深矿井的采矿成本，深度每增加 100 米就增长 6%。

因此，随着开采深度的增加采矿成本会提高和劳动生产率会下降，这是客观规律，是由于采矿工艺、所用矿山机械的参数和劳动组织改进的速度滞后于矿山技术条件恶化和矿山地质条件复杂化速度所致。

因此，以矿石的地下浸出方法代替地下开采方法是解决上述矛盾最重要的措施之一。分析表明，只有在圆满解决金属回收率问题的情况下，从用地浸法扩大开采深度范围的立场出发，这种代替在技术上和经济上才是合理的。

例如，对生产能力为 100 万吨/年矿石的标准热液矿床用地下开采法采出 1 吨矿石的采矿车间成本进行分析表明（表 1-5），开采深度由 200 米增加到 1200 米，不仅采矿成本增加，而且成本结构也显著改变。如果开采深度增加 1000 米，成本增长 80%，即深度每增加 100 米，成本平均增长 8%，则采矿基建工作的成本就几乎增加 5 倍，深度每增加 100 米，成本平均增加 60%，矿石提升费用显著增加（增加 2 倍），排水费用增加 12 倍，充填设施费用也增加。采矿工作的总费用增加 1 倍多，所占比例由 46.5% 提高到 56%。

而在上述标准矿床中为地浸法准备矿石时，随深度增加成本变化的程度就不那么大（表 1-6）。开采深度增加 1000 米，车间成本只增加 50%。在这种情况下，尽管采矿基建工作的成本提高 2.85 倍，采准工作成本提高 30%，而回采成本只提高 25%，但是采矿工作本身的成本所占比例实际上仍然保持在同一水平上，约为全车间生产成本的 68%。由于地浸大部分崩落矿石留在原地，虽然用于由钻井抽出产品液的费用（该费用所占比例最大）增加 4 倍，但是随深度增加，地下运输费、提升费和通风费增加并不多。地下浸出时，在每 200 米间隔中深度每增加 100 米，采矿工作的车间成本平均增长率为 4~6%，而传统的地下开采方法为 8~9%。

但是，如果考虑到在有色金属和稀有金属的生产成本总结构中，采矿成本占 45~50%，而加工和选矿费用占 50~55%，地面运输费占 8~10%，那么对地下采矿方法和地下浸出方法只进行采矿工作方面的生产成本比较就不正确了，因此，为了确立采用矿石地下浸出作为代替传统采矿的一种方法在经济上的合理界限，不仅要涉及地下采矿成本，而且涉及到获得成品的总回收率，这就与金属的总回收率、矿石中金属品位以及金属价值密切相关了。对最终产品金属成本的相对变化与开采深度、矿石金属品位和总回收率的关系的数据进行分析（表 1-7）表明，按金属价值，采矿成本随深度变化而变化的差异就不

表 1-5

指 标	成本 (卢布/吨) 和所占比例 (%)											
	200			400			600			800		
	卢布/吨	%	卢布/吨	%	卢布/吨	%	卢布/吨	%	卢布/吨	%	卢布/吨	%
坑道深度, 米												
生产过程												
基建工作	1.3	7.8	1.9	10.4	2.8	13.4	4.5	18.8	6.0	22.1	7.6	25.5
采准工作	3.6	21.5	3.8	21.0	4.4	19.5	4.3	18.0	4.5	16.6	4.7	15.7
回采工作	2.9	17.3	3.2	17.5	3.5	16.5	3.7	15.5	4.1	15.2	4.5	15.0
采矿工作——小计	7.8	46.5	8.9	49.0	10.4	49.5	12.5	52.5	—	—	—	—
充填工作	2.6	15.5	2.7	14.8	3.3	15.8	3.8	15.8	4.3	15.9	4.3	14.3
地下运输	0.5	3.0	0.5	2.7	0.51	2.5	0.52	2.2	0.53	2.0	0.54	1.6
提升	0.65	3.9	0.73	4.0	1.2	5.7	1.2	5.0	1.6	5.9	1.9	6.3
通风	1.1	6.6	1.2	6.5	1.3	6.2	1.4	5.8	1.5	5.5	1.6	5.3
排水	0.1	0.5	0.3	1.6	0.462	0.68	—	2.8	0.83	3.1	1.03	3.5
全车间费用	3.85	23.0	3.85	20.5	3.8518	—	3.85	16.0	—	—	3.85	12.8
1 吨矿石的车间总成本	16.7	100	18.3	100	21.0	100	24.0	100	27.2	100	30.0	100
车间成本的相对变化	—	100	—	109.5	—	125.6	—	144.2	—	163.2	—	180.4
深度每增加100米, 车间成本的平均增长率	—	—	—	4.8	—	6.4	—	7.4	—	7.9	—	8.0
100米间隔中, 深度每增加100米, 车间成本的平均增长率	—	—	—	4.8	—	8.0	—	9.3	—	9.5	—	8.6

表 1-6

指 标	成本 (卢布/吨) 和所占比例 (%)											
	200			400			600			800		
	卢布/吨	%	卢布/吨	%	卢布/吨	%	卢布/吨	%	卢布/吨	%	卢布/吨	%
采矿深度, 米												
生产过程												
基建工作	0.96	7.0	1.15	7.7	1.64	10.0	2.4	13.2	3.0	15.2	3.7	17.0
采准工作	4.7	34.0	5.0	33.5	5.3	32.3	5.6	31.0	5.8	29.3	6.2	29.2
采区内崩落矿石 (试剂、物料、工资、能源)	3.8	27.4	4.0	26.8	4.1	25.1	4.3	23.6	4.5	22.8	4.7	22.1
采矿工作——小计	9.46	68.5	10.15	—	—	67.5	12.368	0.13	—	—	—	—
地下运输	0.19	1.38	0.19	1.28	0.19	1.15	0.19	1.05	0.20	1.0	0.20	0.93
提升	0.36	2.62	0.39	2.64	0.40	2.4	0.50	2.75	0.51	2.6	0.52	2.45
由钻井抽出产品液	0.16	1.15	0.18	1.88	0.42	2.6	0.54	2.96	0.69	3.5	—	—
排水	0.08	0.6	0.31	2.08	0.46	2.8	0.68	3.75	0.83	4.2	—	—
通风	1.1	7.2	1.17	7.8	1.37	8.3	1.49	8.2	1.66	8.5	1.78	8.3
全车间费用	2.45	17.7	2.45	16.5	2.45	15.0	2.45	13.5	2.45	12.4	—	—
总计	13.8	100	14.9	100	16.4	100	18.2	100	19.7	100	—	—
车间成本的相对变化	—	100.0	—	107.9	—	118.4	—	131.3	—	142.9	—	154.7