第十一篇

特殊矿床开采

第一章　饰面石材开采

第一节　概　　述

一、石材与人类社会发展的关系

人类和石材的关系极为密切，大致可以分为实用的和文化象征的关系。早在距今约250万年的原始群阶段，人类就开始使用经过打制的粗石器，促进了人类本身的进化，石器成了人类社会发展的一个标志。新石器时代晚期和青铜器时代早期，人类遗留了大量的巨石文化，遗迹几乎遍布世界各国，展现了史前的文化符号、母体的象征、崇拜的遗俗等人文功能。在中国，石材所具有的文化象征或文化符号意义源远流长，巨石文化的分布十分广泛，渤海和黄海岸是亚洲巨石文化的两个中心之一。

建筑和雕刻与石材的关系密切。自公元前1世纪，建筑师、雕刻家选用纹理致密的石材开创出标志性的杰作层出不穷：古罗马广场上的纪功柱、佛罗伦萨和锡耶那的大教堂、比萨斜塔、罗马的万神殿等历史性建筑物相继出现。纽约世界贸易中心的双塔摩天楼、华盛顿肯尼迪表演艺术中心、伦敦维多利亚和艾伯特博物馆的台阶、彼得堡的修道院等都用卡腊腊大理石作为建筑材料，天安门前的金水桥、屹立在天安门广场的华表均选用我国的名贵石材。

随着建筑业的发展，建筑材料的需求量与日俱增，石材市场的形成与完善，促进了开采技术的不断革新。在长达一个多世纪采石经验积累的基础上，1854年比利时人发明了

用钢丝加水和沙子切割石块的方法,革新了开采技术。人类在 20 世纪后半叶逐步确立了新的资源观和可持续发展观,在实现石材环保开采方面取得了长足的进步,饰面石材将为改善和美化人类生活不断做出贡献。

二、饰面石材

饰面石材是指具有一定的装饰性能、物理化学性能、加工性能,可加工成一定规格尺寸的建筑材料的岩石。它主要用于建筑物的内外表面装饰。目前商业上的天然饰面石材主要有大理石、花岗石和板石。大理石类饰面石材大多属于沉积的碳酸盐岩及其变质岩如大理岩、蛇纹石化大理岩等,适用,于室内装饰。花岗石类饰面石材大多属于岩浆岩(花岗岩、辉长岩、闪长岩等)和变质的含硅酸盐矿物为主的岩石(如片麻岩、混合岩等),适用于室内外装饰。板石即地质上的板岩,有碳质板岩、钙质板岩等,主要用于外墙面装饰和作屋顶板。

三、饰面石材矿山开采的特点

饰面石材开采是非金属矿开采中有别于普通非金属矿开采的特殊采矿方法,它需要采取多种技术措施和方法,避免或减少在采下的荒料中产生新的裂纹,以提高石材加工的成材率,并保持其良好的品质。

饰面石材分为露天开采和地下开采。在国外,对于覆盖层很厚而品种名贵的石材矿,按确定露天和地下开采的一般原则确定合理的露天开采界线。地下开采方法比较简单,仅空场采矿法一类,一般采用全面采矿法、房柱采矿法和下向梯段采矿法。典型矿山有:意大利 CAR—RARA 矿区的 PIANADEI 合作矿,采用下向梯段采矿法;美国 DORSRT 帝国采石场采用留规则矿柱的房柱采矿法;意大利 TRENDNO 白水采石场采用留不规则矿柱的房柱采矿法。本章只介绍饰面石材矿山的露天开采。

饰面石材矿山开采必须采取特殊的开采工艺,以保证采下的料石具有足够的块度,并且不出现新的损伤。用凿岩爆破的方法开采必须采用控制爆破的方法,钻凿小孔径炮孔,使用弱性炸药;刻槽或钻孔劈裂法在小型矿山使用较普遍;锯切法不仅在大型大理石矿山得到广泛应用,且已用于花岗岩矿山开采。

饰面石材矿山的开采具有其特有的七个工序:分离、顶翻、切割、整形、拖曳和推移、吊装与运输、清渣。前四道工序组成了既相互独立又紧密联系的三个工艺环节:分离工艺、分割工艺和整形工艺。它们需要采用一系列特殊的设备与工具顺序完成。

生产工艺的各个环节都需要围绕提高荒料率去组织与实施。

设计和建设一个石材矿山应符合矿山开采技术条件的一般工业要求，荒料率要达到一定要求。保证大块荒料采出的前提是分析矿体的层理、节理、裂隙等分布规律，合理解决矿点。矿段、首采区问题，关键在于因地制宜地合理确定开采工作面的布置、推进方向以及与之相联系的开拓运输方式，选择相应的开采工艺和技术装备。

第二节　饰面石材矿山开采技术条件的一般工业要求

一、荒料

荒料是指通过采石工艺获得的具有一定规格尺寸的块状岩石。用矿岩做饰面材料不仅要经久耐用，而且要求整个石材的外观具有美丽的色彩和图案，这种装饰美观的程度称为装饰性能。石材的物理性能是指密度、孔隙率、裂纹、吸湿率和抗冻性，主要机械性能是指硬度、强度和耐磨度。硬度是指石材被其他更硬的物体刻划的耐受能力；强度是指石材抵抗外荷载破坏的能力；耐磨度是指石材由于磨耗而使之减少重量和体积的性能。石材的主要工艺性能是指可加工性和研磨性。可加工性是指石材经过刀具加工制成规定的形状和饰面的性能；研磨性是指石材加工过程中刀具的磨耗程度。

荒料应从未经风化的岩体中采出，其形状为矩形六面体，各面名称如图 1－1 所示。荒料大面指加工板材时平行于大锯条的两个面，荒料的两个大面（或材面）不得有裂纹，应与岩石的节理面或花纹走向平行。

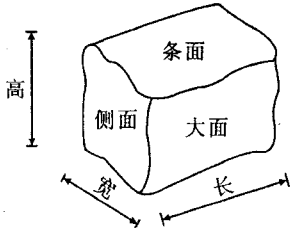


图 1－1　荒料示意图

荒料的品种以荒料的花色、特征及产地来命名。花岗石荒料的每一品种按地区顺序编号。天然大理石按其所具有的相对稳定的颜色和花纹特点而定，开采中如果颜色和花纹特点与原定品种有明显变异时，不能作为同一品种。

荒料的规格按用途划分，用于加工饰面板材的荒料，称规格料。花岗石和大理石规格尺寸如表 1－1 和表 1－2 所示。按用户要求加工的荒料，称协议料。协议料的规格，由供需双方协商规定。单块荒料的重量应适应当地开采、装卸与运输条件。

表 1－1　花岗石规格料的尺寸(cm)

长度	210	160	130	169	115	100	84
高度	110	130	100	96	85	70	44
宽度	95	77	60	46	40	40	32

表 1－2　大理石规格料的尺寸(cm)

长度	90	68	98	115	130	195	140	165	160
高度	48	68	68	85	98	98	130	115	130
宽度	25	25	25	40	40	40	40	40	40

注：规格料的宽度不得小于表中规定，也不得超过需货单位提出的最大宽度要求。

二、饰面石材装饰性与开采技术条件的要求

(1)饰面石材装饰性能的要求

①饰面石材的装饰性能表现为经加工后具有一定的颜色、花纹和光泽度，这些均与其物质成分、结构、构造有关。商业上根据饰面石材的颜色、花纹差异划分出不同品种和档次。·一般较好的饰面石材经加工后，拼装在一个装饰面上显现出颜色纯正、花纹和谐、光泽度高。但由于市场对饰面石材的需求常因人、因地、因时而异，目前还没有明确划分品种和档次的标准，因此对于勘探的品种应由工业部门(建设、生产部门)确定，并共同选定标准样，以此作为鉴定勘探品种的依据。

②饰面石材中存在的某些金属硫化物(如黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等)、泥质物、有机物，由于它们易于风化，影响饰面石材的装饰性能和耐久性，因此含这些杂质较多的饰面石材一般不宜用于室外装饰。

饰面石材中的色斑、色线影响饰面石材的装饰性能，因此在有关饰面石材荒料、板材的标准中对它们均有限制。饰面石材中的空洞对装饰性能也有影响(有时可通过某些措施予以弥补)。此外碳酸盐岩饰面石材中的石英、燧石除可能影响装饰性能外，还对加工性能有影响。

(2)荒料块度与荒料率的一般要求

①荒料块度的划分与要求。对于年产 3000m^3 以上饰面石材荒料的矿山，荒料块度

一般可划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类，它们的块度分别大于或等于 $3m^3$、$1m^3$ 和 $0.5m^3$。一般要求荒料的边长不小于 0.5m，中档和一般档次饰面石材荒料的块度大于 $1m^3$。

②荒料率的要求。饰面石材矿山的荒料率是指所获得的荒料体积与开采矿体的总体积之比，通常以百分数表示，即：

$$荒料率 = \frac{获得的荒料体积}{开采矿体的总体积} \times 100\% \qquad (1-1)$$

一般要求中档饰面石材矿山的荒料率不小于 20%，在其他技术经济条件相近的情况下，对于高档饰面石材矿山荒料率的要求可相应降低，对一般饰面石材矿山荒料率的要求可相应提高。

③对板材率的要求。饰面石材矿山的板材率是指单位体积荒料经加工后所获得的具有一定规格尺寸的抛光板材的面积，用 m^2/m^3 表示。

一般要求中档饰面石材的板材率不小于 $18m^2/m^3$；在其他技术经济条件相近的情况下，对于高档饰面石材矿山的板材率要求可相应降低，对一般档次的饰面石材板材率可相应提高。

（3）对矿山开采技术条件的要求

①矿体可采厚度：不小于 3m。

②夹石剔除厚度：不小于 2m。

③最低开采标高：一般要求不低于矿区当地的侵蚀基准面，在技术经济可行的条件下，可低于当地的侵蚀基准面。

④露天采矿场最终边坡角：应根据边坡的高度和工程地质条件确定，块状岩石边坡角一般为 50°～90°，松散状岩体边坡角一般不大于 45°。

⑤露天采矿场最小底盘宽度：一般不小于 30～40m。

⑥剥采比：一般视矿床开发总的经济效益而定。

第三节　开采工艺

一、剥离

饰面石材矿山的剥离物有覆盖层、风化层、夹层、围岩和荒料率很低、没有开采价值的矿石等。

除松散土岩可直接进行挖掘外，一般均需采用凿岩爆破方法剥离。为了使矿体不产生新的裂隙，为了提高荒料率和大规格荒料的比例，在接近矿体处应采取如下措施：①采用威力小的炸药；②用锯石机形成锯切面，以隔断或减弱爆破产生的震动波在矿体内的传递；③控制炮眼深度，一般眼底应距锯切面 0.2m，没有锯切面时，眼底距矿体 0.3～0.5m。

矿体内不厚的夹层，不宜采用爆破，否则易使矿体产生新的裂隙。可采用与采石相同的工艺，必要时可在分离后爆破或用其他方法破碎。

根据剥离量和运距，采用如下方式装运：①剥离量不大、运距不远的矿山，可用人工装车，窄轨矿车运输；②生产规模较大、剥离量大、运距较远的矿山，目前多采用轮胎式前装机装载，汽车运输；部分矿山用吊装荒料的设备装载，或两种设备兼用。

二、开采工序

石材开采工序分为分离、顶翻、切割、整形、拖拽和推移、吊装与运输、清渣等七个工序，完成荒料开采的全部工作。

（1）分离

分离是指采用适当的采石方法，使长条块石脱离原岩体的工序。这是采石工艺中最重要的工序（图 1－2）。

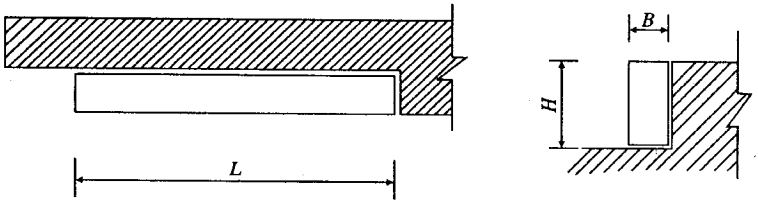


图 1－2　长条块石示意图

采用如下方法确定长条块石的基本尺寸：

①长条块石的长度 L 一般等于预定最大荒料宽度 B 的整倍数，并适当考虑整形余量，常用的长度为 10～20m，最长达 50m。

②台阶（或分段）的高度应为长条块石高度 H 的整倍数，一般为 3～6m，少数达 12m 或更大些，在缓倾斜层状矿体中，H 应为层厚。

③长条块石的宽度 B 等于加工设备可以加工的荒料的最大宽度或其一半，或 1/3，即两块或三块荒料拼装的总宽度等于加工设备可以加工荒料的最大宽度，更多块荒料拼装

认为是不经济的，通常 B 等于 1.5～3.0m，少数达 5～6m，因此长条块石的体积一般为 45～360m^3，重为 120～1000t。

长条块石尺寸的确定须十分注意节理（裂隙）的走向及其间距，充分利用天然节理与裂隙，据此调整其三向尺寸的大小。

（2）顶翻

实际生产中，由于长条块石一般高度大、宽度小，为了切割的方便，要将其翻转 90°平卧在工作平台上。若长条块石体积较小，可借助钢钎等工具人工将其撬拨翻倒；体积大的均采用液压顶石机或推移包将其顶翻。

（3）切割

切割又称分割、分切、解体，即按照荒料尺寸，将长条块石分割成若干荒料坯。一般采用劈裂法或锯切法。前者可用于大理石和花岗石，后者仅用于大理石，

（4）整形

整形是将荒料坯超过标准规定的凸出部分，采用劈裂法或专用的整形设备予以切除。

（5）拖拽或推移

对于采用固定吊装设备的矿山，由于吊装设备的工作范围有限，必须采用牵引绞车将吊装范围外的荒料拖至吊装范围内，或采用推土机、前端装载机推移至吊装范围内，方可起吊。

（6）吊装和运输

石材矿山大多采用专用的固定式吊装设备桅杆起重机，起吊能力为 15～50t，运臂长 15～50m。它的使用为实现高台段开采创造了条件。它适用于开采面积小、采深大的多分段同时开采的石材矿山。对于采场面积大、采深小的石材矿山，采用移动式起重设备，如汽车起重机、履带起重机，用以克服桅杆起重机吊装范围有限的缺陷，并可为多矿点服务。近年来国内外一些条件适宜的矿山选用大功率、大斗容的前端装载机铲装荒料，或两台前端装载机抬起荒料装入运输设备，运至目的地。使用前端装载机铲装荒料的优点在于简化采矿设备，用一种设备兼做清渣、推移和装载荒料的工作，提高了设备的利用率。

运输设备一般采用底盘较低的载重汽车，国外大部分矿山采用平板拖车。

（7）清理废料

把截取荒料后遗留在采场内工作平台上的碎石加以清除并运至废石场排弃或集中堆置，以备综合利用。

三、采石工艺过程

采石工艺过程分为分离、切割和整形。

(1)分离

可采用单一或联合的分离方法实现分离。如普通的凿岩劈裂法和爆裂法;适用于大理石荒料开采的机械锯切法;适用于花岗石荒料开采的光面爆破技术;适用于开切割槽的火焰切割法等。

①劈裂分离

用各种形状的钢凿或凿岩机凿眼,然后用钢楔或专用组合楔、液压劈裂器进行劈裂分离,适用于各种产状、形态复杂、节理裂隙发育的矿体,特别是小型花岗石、大理石矿山。

a)楔子分离。将若干钢楔按一定间距打入矿体裂隙或沿裂隙开凿的楔窝内,依次重复锤击钢楔,直至长条块石与矿体分离。适用于裂隙发育、生产规模较小的矿山,效率高,成本低,但分离面平整度较差。

b)钻眼楔子分离。在预定分离面上打一排眼,眼间距一般为 10 ~ 20cm,眼深一般比条石高度或宽度小 10 ~ 30cm,将钢楔插入眼内,依次重复锤击,借钢楔的挤胀力形成分离面。

有的花岗石矿山采用连续钻眼法,各眼基本上相接。打眼顺序是用凿岩机隔一眼打一眼,然后放入钢钎,再在此两眼之间打眼,眼深与条石高度一致。由于相邻眼难以全部相接或钻眼有一定偏斜不能直接形成分离面,往往需辅以打楔劈开。

钢楔形状及规格见图 1 – 3 和表 1 – 3。

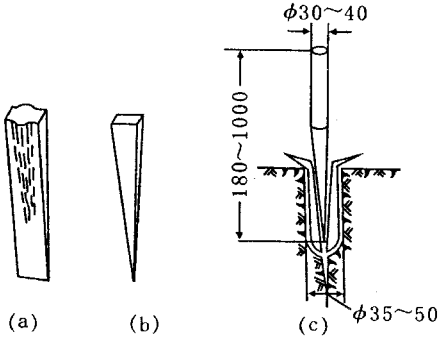


图 1 – 3　钢楔的形状

表 1－3　钢楔规格

钢楔类型	长(mm)	宽(mm)	厚(mm)
扁平楔	180～470	40～130	25～80
角锥楔	150～580		25～50
复合楔	180～1000	上端圆柱形直径为 30～40mm,下端楔形	

c)钻眼劈裂器分离。以劈裂器代替钢楔,不仅减轻了劳动强度,提高了生产效率,而且具有挤胀力大且均匀的优点。液压劈裂器技术性能见表 1－4。均匀的挤胀力能使分离面各部分达到抗拉极限的时间趋于一致,因此分离面较平整。眼间距一般为 20～50cm。

表 1－4　液压劈裂器技术性能

项　目	型　号			
	PLUOSPAK		HS230	4/F210
	186	188		
发动机功率,kW				
发动机	4	4	2.2	
柴油机	5.2	5.2	3.0	4.5
风动机	2.6	2.6	3.7	
工作压力,10^5Pa	500	600	700	500
劈裂楔推力,10^4N	225	270	230	500
劈裂楔数量,个	6	6		4
要求最小孔径,mm	34	40	34	42
要求最小孔深,mm			430	630
质量,kg	36	57		
制造厂	意大利 BENETTI 公司		意大利 PELLEGRINI 公司	德国 PORSFELD 公司

劈裂分离法能较好地利用裂隙,工艺简单、投资少、成本低,但劳动强度大、劳动生产率较低,不适于大规模开采。

②爆裂分离

确定爆破参数要考虑矿体的结构、裂隙、岩石硬度等因素。根据爆破材料不同,目前使用的控制爆破方法主要有以下三种。

a)黑火药爆破。一般平行于矿体层理、裂隙方向布置水平炮眼,深度为条石宽度的 0.5～0.6,眼距为 1～1.5m。垂直炮眼的深度,一般为条石高度的 0.6～0.8,眼距为 0.8

~1.2m。单位炸药消耗量可参考类似矿山确定，一般为 100 ~ 150g/m³。可采用分段装药等措施避免因爆力集中而产生裂纹。

b)燃烧剂爆破。燃烧剂爆破又称近人爆破，采用一种低燃速金属燃烧剂，用电阻丝或点火头引爆，爆破参数见表 1 - 5 和图 1 - 4。

表 1 - 5　宜兴大理石矿燃烧剂爆破参数

爆破参数名称	数　值	备　注
最小抵抗线，m	(0.9 ~ 1.2)B	B 为条状块石宽度
炮眼深度，m	0.67H	H 为条状块石高度
炮眼间距，m	0.4	
装药系数，g/m²	14	

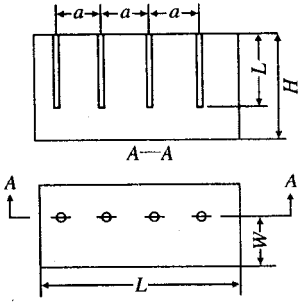


图 1 - 4　燃烧剂爆破参数

最小抵抗线(W)为：

$$W = B \tag{1-2}$$

式中　B——条石宽度，m。

炮眼间距(a)为：

$$a \leqslant 0.8W \tag{1-3}$$

炮眼深度(L')为：

$$L' = (0.67 \sim 0.75)H \tag{1-4}$$

式中　H——条石高度，m。

炮眼燃烧剂量(Q)为：

$$Q = \frac{DHL}{\frac{L}{a} - 1} \tag{1-5}$$

式中　D——装药系数，g/m^2；

L——条石长度，m；

$\frac{L}{a}-1$——炮眼数，$\frac{L}{a}$取整数。

边眼的燃烧剂量可根据边距大小适当调整。宜兴大理石矿燃烧剂爆破参数见表 1－5。

燃烧剂采用电起爆，交流直流均可。可选用 70 式起爆器。连线方式有串联、并联、串并联。电流强度要大于点火头的准爆电流强度（目前为 2A）。

目前使用的金属燃烧剂、点火头均为工厂特制药包，直径 32mm，密度为 1.04。药包加工与常规药包加工相似。若购进的点火头不带脚线，则按需要长度在点火头两端接脚线，然后将点火头放入药包并捆紧待装。

炮眼装填与常规爆破略有不同，炮棍要特制。在钢棒端部装上铜头，铜头直径较钢棒直径大 6mm 左右，铜头的长度为 15cm。为了便于装填时锤击，需配备数根不同长度的炮棍。充填物选用含水量小于 15%的黄土。装药前无在眼底填 3～5cm 的黄土，再将药包装入，然后填入 5～10cm 的黄土，用炮棍轻轻捣实，边充填黄土边用大锤打击炮棍顶部，使黄土充填密实。

c）导爆索爆破。爆破材料为导爆索，在钻眼中插入导爆索至眼底，眼中充以水或细砂。如爆力不足，可装 2 根或 3 根导爆索，或采用爆力大的导爆索，也可以适当减少孔距。从钻孔引出的导爆索在地面与导爆干索（与眼内的导爆索相同）连接，常用的连接方法是搭接法。连接处必须用胶布或细绳捆扎结实，搭接长度不小于 10cm，并应使干索和导爆索的传爆方向一致，以保证起爆质量（图 1－5）。

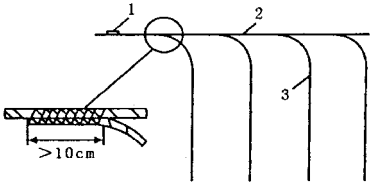


图 1－5　导爆索连接方法

1—雷管；2—导爆干索；3—导爆索

导爆索爆破的眼距为 20～40cm，可经试验确定。眼深与条石高度、宽度基本一致，若条石另一面已有自由面，则眼底应距自由面 10～20cm，以充分利用爆力。

导爆索爆破可用于一面分离，也可用于双面分离，即水平面和垂直面同时进行爆破。

通常在双面爆破时可用毫秒雷管起爆。有的矿山也用于三面爆破,即包括条石端面。

为保证钻眼的垂直或水平,并减轻劳动强度、提高效率,常采用滑架式凿岩机,技术性能见表 1－6 和表 1－7。

表 1－6　意大利滑架式凿岩机技术性能

技术性能	单位	TB－600 型	QB－25 型
凿岩机型号		23/35kg 手持凿岩机	TY－85 型凿岩机
凿岩机台数	台	2	2
钻杆长度	m	2.4 或不同的长度	0.3;1.6;2.4;3.2
钻头直径	mm		31;32;33;34
钻机有效行程	m	2.05	1.8
耗风量	m^3/min		3,4
气动发动机功率	kW	1.6	
滑轨长	m	4.6	
空压机电机功率	kW		22
生产厂		意大利 BENETTI 公司	意大利 PELLEGRINI 公司

表 1－7　日本滑架式凿岩机技术性能

技术性能	单　位	指　标
凿岩机型号		YD－55
凿岩机台数	台	1
气动发动机功率	kW	2.2
导向架全长	mm	3925
钻机有效行程	mm	2930
移设导向架的有效长度	mm	2850
外形尺寸(宽×高)	mm×mm	3700×3945
总重	kg	1000

③大理石荒料的机械锯切分离

a)普通钢索锯石机锯切。锯石机的驱动装置带动无极钢丝绳(φ3.89mm,φ4.5mm)运行,在工作面夹带磨料(石英砂或普通砂)、水与大理石摩擦,起到切割作用。锯石机工作情况见图 1－6。

普通钢索锯石机的适用条件是岩石坚固性系数厂在 12 以下、层厚在 10m 以上的急倾斜矿体,或水平与倾角较缓的薄层矿体。一般来说能适应裂隙发育程度不同的矿体,但如果溶洞发育,尤其是无充填物的溶洞和开口裂隙,锯切时砂水料会大量流失,对锯切极为不利。应具有较为经济的水源和砂料来源,而且只能在非冰冻期使用。使用钢索锯

石机需要穿孔机、分离式千斤顶等专用配套设备。普通钢索锯石机的优点是:灵活,可以做任何方向的锯切;一次锯切深度依据开采要求可达 5m、10m 甚至 15m,可以有效地加大开采台阶尺寸;可以依据矿体裂隙的分布,使开采台阶尺寸合理,有利于提高荒料率;生产效率较高;开采成本低。组合型钢索锯石机效率比单列型钢索锯石机高 0.5～3 倍。材料消耗主要是石英砂、钢索和滑轮等普通材料。由于开采效率较高,非生产性开支相对减少,有利于矿山综合成本的降低;设备结构简单,配件容易解决,是我国现阶段大理石开采比较适用的方法。

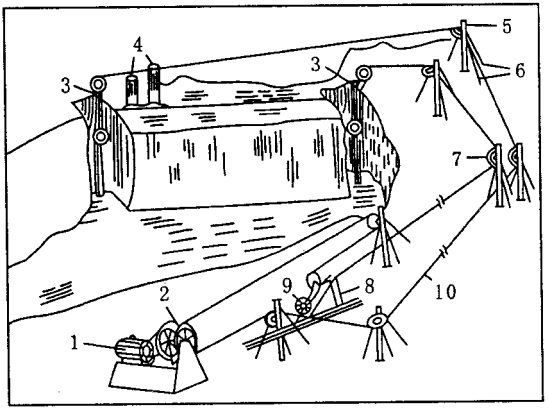


图 1－6　普通钢索锯石机工作示意图

1—电动机;2—绳轮;3—工作立桩;4—砂、水装置;5—导向立杜;
6—张紧绳;7—导向滑轮;8—拉紧装置;9—重物;10—无效钢绳

b)金刚石串珠式钢索锯石机锯切。切割工具为多根细钢丝绞成的无极钢丝绳(φ4.5～5mm),钢丝绳上间隔固定镶嵌金刚石的圆柱状套筒,简称金刚石串珠,串珠长 5～7mm,直径为 10mm,两串珠间有弹簧。无极钢丝绳由驱动装置带动进行切割,切割时需注水。金刚石串珠式钢索锯石机工作情况见图 1－7。

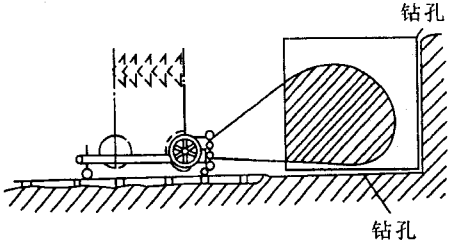


图 1－7　金刚石串珠式钢索锯石机工作示意图

金刚石串珠锯的优点是:锯切效率高,串珠锯的锯索线速度比钢索锯高 2 ~ 4 倍,单位时间的锯切面积为钢索锯的 4 ~ 7 倍;锯切质量高,锯切面平整光滑,基本上不需要再整形即可加工;操作维护简单,辅助工作时间短(包括锯石机安装、穿接串珠绳等),熟练的操作人员完成一次锯机换位安装只需 20 ~ 30min,同样的锯切面积,串珠锯的辅助工作时间比钢索锯减少 1/3;适应性强且灵活,以它为主机,配合其他辅助设备,可进行开掘堑沟、分离、解体和整形等锯切,分离尺寸可以根据裂隙赋存状况进行灵活调整,可作水平、倾斜和垂直锯切;使用套索法,不会产生锯切弧度,可以不需要掘进堑沟实现无沟开采;开采费用低,荒料率高,改善了劳动条件,是我国现阶段及今后重点推广普及的大理石开采设备。常用的辅助设备是液压钻机和导向切割立柱。

c)链臂式锯石机锯切。把镶嵌硬质合金或金刚石的切割刀具安装在锯臂四周的链条上,链条在驱动装置带动下运行,刀具随之切割岩石。锯石机在轨道上沿工作面移动完成锯切,切割时需注水。切割效率高,是普通钢索锯石机效率的 5 倍。缺点是需在轨道上行走作业,不灵活;刀具厚,锯口宽度约 40mm,矿石损失大;能耗大;切割深度受锯臂长度的限制。

d)圆盘式锯石机锯切。把硬质合金或金刚石切割刀具安装在圆盘上,驱动圆盘即可切割岩石。锯石机在轨道上沿工作面移动完成锯切作业。生产能力与岩石抗压强度有密切关系,抗压强度大,则生产能力低。优缺点与链臂式锯石机基本相同。

④花岗石荒料的光面爆破开采

花岗石质地坚硬,可锯性差,但可劈裂性好。目前花岗石开采技术有火焰切割法、密集钻孔切割法、控制爆破法和金刚石锯锯切法等,其中控制爆破法应用最广。

在采石场中,钻孔作业分为三个阶段:初次钻孔(分离巨大岩块)、后续钻孔(分割已分离出的大块)和最终整形。初次钻孔采用光面爆破技术成功与否,取决于正确的钻孔排列和所钻炮孔的精度。当垂直钻孔时,应在水平孔排面以上 20cm 处停止钻进,防止与水平炮孔相交。炮孔超深或方向不准都会在原岩中产生破坏作用。当岩块具有三个或三个以上钻孔排面时,排面交角必须大于 90°(图 1 - 8)。

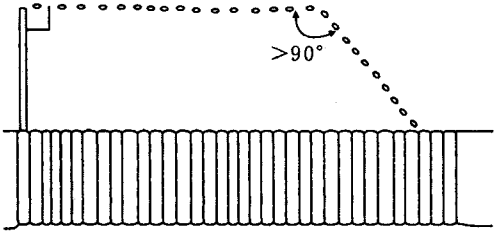


图 1 - 8　垂直钻孔的排面交角

一般情况下,水平孔应完全水平地钻进,而垂直孔排面则应有 3°~5°的后倾。当利用自然水平层理面时,垂直孔应垂直钻进,保证被分离的岩块可以自由地向前运动而不受阻碍,如内束夹角和两侧突出会造成岩块挤死并破坏周围的岩石。

孔距通常为孔径的 10~15 倍,对某些岩石来说可高达 20 倍。多数岩石沿水平面比沿垂直面容易劈裂,而且在纵横两个垂直面上也常显不同。垂直排孔的孔距在 15~40cm 范围内变化,水平孔距为 20~50cm,需通过试验确定最佳孔距并用以指导生产。

确定最大孔径的方法是沿不同方向钻凿一系列不同孔距(在 10~20 倍孔径范围变化)的炮孔,这些炮孔中的装药量可以多一些,这样就能找出能够保证岩石预裂效果的最大孔径。适当减小这一孔径,以保证预裂的效果。

精确的初次钻孔能减少废石的产出并减少最终整形阶段的钻孔工作。初次钻孔占采石场总钻孔量的 20%~45%。

采用光面爆破分离岩块,意味着控制从一个孔到下一个孔的爆轰作用方向,而当排面不直时,爆轰作用会被引导到周围岩体中,造成大面积的破碎。

⑤火焰切割分离

将燃油雾化后与压气或氧气混合,在喷射器燃烧室燃烧,从喷嘴喷出高温、高速火焰(温度约 1500℃,速度约 1340m/s),冲击、加热岩石,由于岩石中不同矿物对热反应的特性不同,从而产生剥落,逐步形成沟槽。

这种分离工艺仅适用于石英含量高、热容量小、膨胀性大、导热性差的岩石,如花岗岩、闪长岩、正长岩等。

火焰切割机的特点是设备简单,操作方便,效率高,岩石不产生暗伤,切割表面光滑,不受季节影响。但噪音大(为 120~130dB),粉尘多(约 0.2m^3/h),燃油消耗量大,岩石表层有损伤(深度 5cm 左右)。因,此,一般仅用于切割采准沟槽。

(2)分割

将从原岩上分离开的巨大石块,分割成较小的块度。

为了分割,一般需将条石翻倒,翻倒的地面需铺碎石垫层,用以缓冲。翻倒作业所用设备有气压顶石包、水压顶石包和液压顶石机。顶石包插入分离面的缝隙中,充以压缩空气或压力水,顶推条石。使用顶石机需开凿放置顶石机的槽窝,有的矿山将顶石机与顶石包配合使用。水压顶石包是焊接两块薄钢板的四周而成,一般呈方形,规格为(0.8~1.0m)×(0.8~1.0m),厚 5~8mm,使用一次即报废。气压顶石包为高强纤维橡胶或塑料制品,作业时两面垫有薄钢板,能多次重复使用。

有的矿山利用慢动绞车拉拽翻倒条石,然后进行分割。分割面位置必须根据裂隙分

布情况及荒料规格来确定,尽量减少损失。

分离的许多方法也用于分割,如钻眼楔子、钻眼劈裂器和金刚石串珠锯。

(3)整形

条石分割后,不符合荒料规格要求的,需要整形。整形常用的方法是手锤打钎法或使用整形机。

第四节　石材矿山生产能力和开采要素

一、石材矿山生产规模的确定

(1)荒料生产能力的确定

主要根据国内外市场需要、矿床资源、建设条件、技术装备和经济效益等各方面因素确定生产规模。为避免盲目性,一般情况下荒料的开采规模不宜过大,生产能力不受最小服务年限的制约。

荒料生产能力根据生产规模、技术装备和选择的开拓方案确定,然后验证其可能性,经方案比较确定其经济合理性。若最终产品是板材,则荒料生产能力(A_H)按下式计算:

$$A_H = \frac{Q}{\eta B} \quad (m^3/a) \tag{1-6}$$

式中　Q——板材生产能力,m^2/a;

η_B——板材率,m^2/ms。

(2)荒料生产能力的验证

由于石材矿山的开采规模较小,开采强度不大,生产能力通常不受新水平准备时间及相应的延深速度的限制,因此,在技术上可能达到的生产能力主要取决于工作面生产能力和可能布置的工作面数量。对矿床规模小、开采强度大、新水平准备时间长的矿山,需要按延深速度验证生产能力。

①工作面荒料生产能力

石材开采的分离、分割及整形三道工序,对某一条石来说是顺序进行的,对一个开采工作面来说则通常是交叉进行的。这三道工序中分离作业耗时最多,因此,工作面的生产能力主要取决于分离作业的生产能力。按工作面工艺的不同,生产能力计算如下:

a)锯石机开采工作面。使用钢索锯石机、链臂式锯石机或圆盘式锯石机进行分离作

业时，工作面的荒料生产能力（A_G）为：

$$A_G = \frac{\eta H' B q_b q_z}{H' q_b + B q_z} \quad (m^3/班) \tag{1-7}$$

式中　η——荒料率，%；

H'——分台阶高度，m；

B——条石宽度，m；

q_b——锯石机水平切割效率，m^2/班；

q_z——锯石机垂直切割效率，m^2/班。

b）钻眼劈裂或钻眼爆破工作面。工作面荒料生产能力（AG）为：

$$A_G = \frac{\eta B H' N a l}{B_1 + H_1} \quad (m^3/班) \tag{1-8}$$

式中　N——同时工作凿岩机台数；

a——凿岩机效率，m/台班；

l——钻眼间距，m；

B_1——水平眼深度，m；

H_1——垂直眼深度，m。

上述计算中未考虑劈裂时间或装药爆破时间，如所占时间比例较大，则应相应降低其生产能力。

c）水平切割或垂直切割采用锯石机，另一面的切割用钻眼劈裂或钻眼爆破。

水平切割用锯石机，垂直切割用钻眼劈裂或钻眼爆破，生产能力（AG）为：

$$A_G = \eta H' q b \quad (m3/班) \tag{1-9}$$

$$A_G = \frac{\eta H' B N a l}{H_1} \quad (m^3/班) \tag{1-10}$$

根据两式计算结果，取较小值。

垂直切割用锯石机，水平切割用钻眼劈裂或钻眼爆破，生产能力（AG）为：

$$A_G = \eta H' q_z \quad (m^3/班) \tag{1-11}$$

$$A_G = \frac{\eta H' B N a l}{B_1} \quad (m^3/班) \tag{1-12}$$

根据两式计算结果，取较小值。

为充分发挥锯石机的能力，应有足够的凿岩机同时工作，使工作面生产能力不受凿岩能力的限制。

②按可能布置的工作面数验证生产能力

$$A_H \leqslant \frac{L_1}{L} A_G n n_b \quad (m^3/a) \tag{1-13}$$

式中　L_1——工作线长度，m；

L——工作面长度，m；

n——年工作日数；

n_b——每日工作班数。

(3)矿山采剥生产能力(A)

$$A = \frac{A_H(1+K)(1+n_s)}{\eta} \quad (m^3/a) \tag{1-14}$$

式中　A_H——荒料生产能力，m^3/a；

K——吊装运输损失，一般为 0.5% ~ 1.0%；

n_s——生产剥采比，m^3/m^3；

η——荒料率，%。

二、工作线方向的确定

工作线的方向对荒料率有很大影响。由于矿体中常存在发育程度不同的各种裂隙，在确定工作线方向时，必须首先掌握矿体的裂隙状况，对地质勘探报告或能作为设计依据的地质资料所提供的裂隙成因、产状、密度及其分布规律等进行详细分析研究，找出主要裂隙方向，并加以充分利用，尽量避免工作线与主要裂隙斜交，以提高荒料率。

由于矿体的主要裂隙具有一定的方向，所以应采用平行推进的方式进行开采。如果有的矿区在不同矿段裂隙分布规律不同，应分别确定合理的工作线方向。在开采过程中，工作线方向可根据裂隙的变化作适当调整。工作线的推进方向需根据地形、基建工程量、生产剥采比、开拓运输系统等综合分析确定。

三、开采要素

一般情况下把矿山划分为若干个台阶和分台阶进行开采。每个台阶形成一个完整的系统，完成剥离、采矿、吊装和运输工作。在工作线推进过程中，每个分台阶应具有一定宽度的作业平台。采用移动式起重机吊装时，分台阶的作业平台宽度不宜过大，因为这种设备的工作范围很小，常需要借助牵引绞车配合作业，减小平台宽度，以提高吊装效率。

露天采石的开采要素如图 1-9 所示。

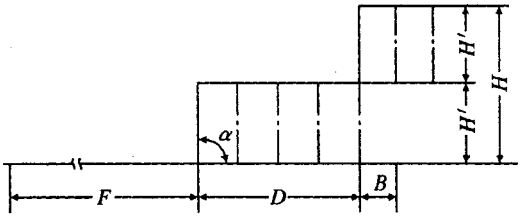


图 1－9　石材开采要素示意图

H—台阶高度；*H'*—分台阶高度；*B*—条石宽度；
D—分台阶最小工作平台宽度；*F*—台阶最小工作平台宽度；α—分台阶坡面角

（1）台阶与分台阶高度

①台阶高度主要取决于吊装起重设备的技术性能。为了减少开拓工程量，应尽量加大台阶高度。采用桅杆式起重机寸，加大台阶高度可减少移设起重机的次数。

②分台阶高度主要根据开采设备的技术性能、荒料最大规格等因素加以确定。如矿体水平裂隙比较发育，应充分研究裂隙的规律，根据裂隙分布状况划分分台阶。为了提高荒料率，在条件允许的情况下，应尽量加大分台阶高度，尤其是裂隙分布复杂时，加大分台阶高度对提高荒料率很有好处。

与吊装设备、开采设备相适应的分台阶高度见表 1－8。

表 1－8　分台阶高度

设备类型	分台阶高度，m
金刚石串珠式钢索锯石机	≤5～10
普通钢索锯石机	≤5～6
圆盘式锯石机	≤0.4～1.0
链臂式锯石机	≤1～3

（2）分台阶坡面角

分台阶坡面角一般为 90°，最终分台阶坡面角及台阶坡面角根据岩石稳定情况确定。

（3）条石宽度

确定条石宽度需要考虑的主要因素是开采设备的技术性能、荒料的最大规格和裂隙情况，一般为 1—3m。鉴于条石宽度的变化对开拓运输系统和开采程序不产生影响，所以在开采过程中可根据需要加以适当调整。特别是矿体中存在与工作线方向平行的裂隙时，必须根据揭露的裂隙分布情况确定条石宽度，以减少损失，提高荒料率。

（4）工作面长度

工作面长度是指工作线上一个采掘区段的长度。人工开采一般为 5～15m；钢索锯

石机一般为 10～20m；链臂式、圆盘式锯石机一般为 100～200m；火焰切割机一般为 15～20m。

（5）最小工作平台宽度

①在台阶上需要进行开采及吊装运输作业，最小工作平台宽度一般为 20～25m。

②分台阶平台的最小宽度应保证开采作业的正常进行，一般为分台阶高度加 2～3m。

部分矿山开采要素见表 1－9。

表 1－9　部分石材矿山开采要素

矿山名称	主要装备			普氏系数 f	台阶高度，m	分台阶高度，m	台阶最小工作平台宽度，m	工作台阶坡面角，°	采准堑沟规格，m
	开采	吊装	运输						
赣榆县大理石矿	普通钢索锯石机 串珠式金刚石锯石机	桅杆起重机	汽车	8～12	42	3	20	90	
连县大理石矿	普通钢索锯石机	桅杆起重机	汽车		2452	4	10	90	基坑：长 10、宽 10、深 4
潼关大理石矿	普通钢索锯石机	履带起重机	汽车	12～13	6	2	20	90	长 20、宽 1.5、深 2.5
黄石大理石矿	普通钢索锯石机	履带起重机	汽车	7～8	6	2	20	90	长 20、宽 1.5、深 2.5
中惠公司松柏岭花岗石矿	液压滑架式凿岩机	轮胎起重机	汽车	16～18	5		12～15	90	
乳山花岗石矿	滑架式凿岩机	履带起重机	汽车	15～18	8	4	16	90	

四、新水平准备和采准堑沟、采准基坑的开掘

（1）新水平准备

新水平准备工程的内容包括：开掘建立运输通路的倾斜和水平沟道，按分台阶开掘采准堑沟或采准基坑。

（2）采准堑沟的开掘

为开辟工作面，安装钢索锯石机的工作立柱，需在工作面两侧垂直工作线开掘采准堑沟，相邻工作面之间的采准堑沟可共用。堑沟长度根据工作面长度及数量按回采矿量保有期计算确定，宽度一般为 1.5～2m，深度应大于分台阶高度 0.3～0.5m。采准堑沟的开掘方法有两种：凿岩控制爆破法和切割法。

①凿岩控制爆破法

用控制爆破法可尽量减小对矿体的破坏。当矿山存在大开口的裂缝或沟时,可把它扩大成符合要求的采准堑沟,或利用它隔离爆破力。

花岗石凹陷采石场在开沟过程中能回收部分荒料。

倾斜堑沟也称为斜坡道,坡度一般为 10°左右,最大约 14°。竖向炮孔呈 15°~20°的倾角,其凿岩深度不必与抬起炮孔相接,而是相距 0.3~0.6m 即停止,下部的抬起炮孔与斜坡道底板之间的夹角为 2°~3°。

斜坡道建成后,需要开掘切割槽,形成荒料的开采工作面。切割槽的形成,可以采用密集钻孔法。

②机械切割法

a)利用 MPH220/320 型多用钻机与普通钢索锯石机联合切割,如图 1-10。

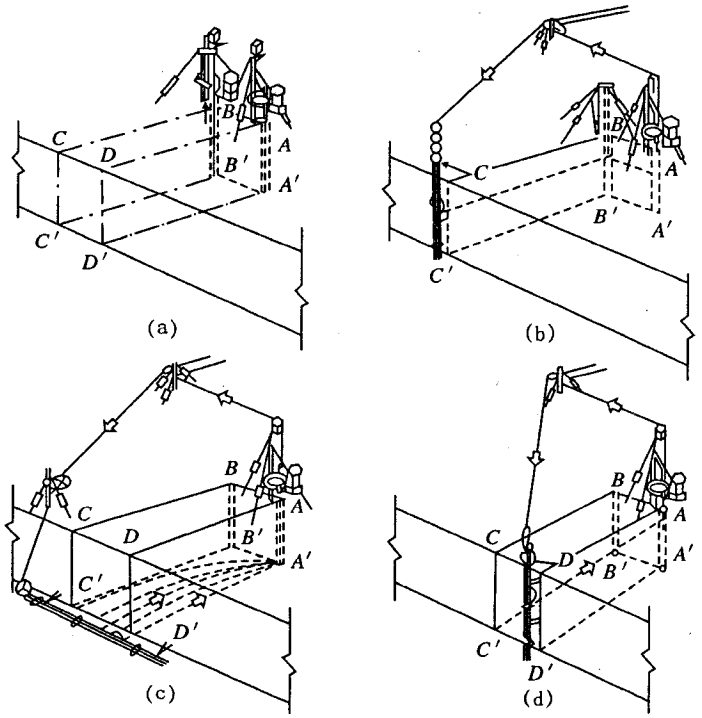


图 1-10　MPH200/320 型多用钻机与普通钢索锯石机联合切割采准堑沟

切割方法:在需切割的采准堑沟端部钻两个孔 AA'、BB',切割两个垂直面 $ABB'A'$、$BCC'B'$。钢丝绳从锯石机引到钻机 A 绳轮,绕到月的旋转圆盘,再绕到外部的工作立柱,引回到锯石机构成钢丝绳回路,两个面同时向下切割到底,切割水平面 $A'B'C'D'$。移

开钻机月，将外部工作立柱摆平，砂、水自 C' 处供给，然后从 B' 处开始呈扇形切割，砂、水供给点随锯切位置改变逐步由 C' 移动到 D'，当生产工作立柱的绳轮从 C' 移至 D' 时，水平切割结束。钻机 A 和外部工作立柱之间垂直切割到底，完成采准堑沟切割。

MPH220/320 型多用钻机技术性能见表 1－10。

表 1－10　MPH220/320 型多用钻机技术性能

项目	单位	指标	备注
旋转电机功率	kW	7.4	
油泵电机功率	kW	0.74	
沿圆柱滑动行程	m	1	
钻机质量	kg	240	不包括旋转电机、油泵、配件
钻机总重	kg	320	
制造厂	意大利 PELLEGRINI 公司		

b)利用 025 型多用钻机、015 型导向切割立柱与普通钢索锯石机联合切割 V 形采准堑沟，如图 1－11。

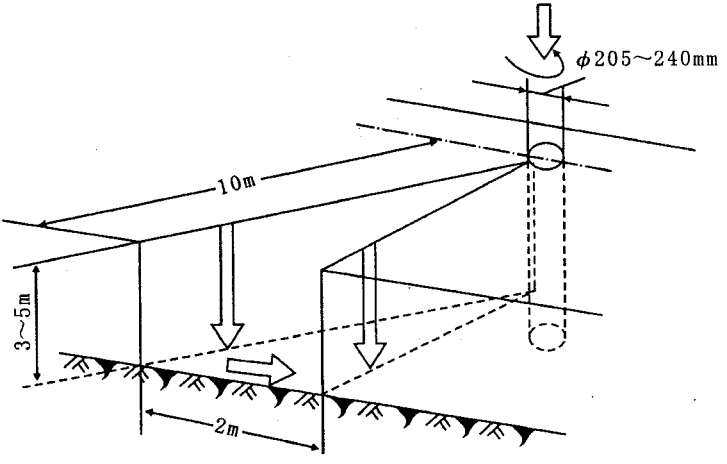


图 1－11　025 型多用钻机、015 型导向切割立柱与普通钢索锯石机联合切割 v 形采准堑沟

切割方法：先用 025 型多用钻机在拟切割的 V 形沟顶端钻凿 φ205～φ240mm 的孔，然后在孔内放入装有导向压绳轮的 015 型导向切割立柱，外部利用普通钢索锯石机用的工作立柱，引入锯石钢丝绳，即可进行切割作业。

(3)采准基坑的开掘

凹陷露天矿若采用多用钻机、切割立柱与钢索锯石机相配合的开采工艺，开采时无

需安装工作立柱,因此不用开掘采准堑沟。但在新水平准备时需要开掘采准基坑,逐步扩大,形成工作线。基坑边长一般为 10 ~ 15m,深度与分台阶高度相等。

开掘方法:先在拟开掘的基坑四角用多用钻机钻孔,直径为 220mm,深度与分台阶高度相等,再用普通钢索锯石机配合导向切割立柱沿四边进行垂直切割,最后在基坑范围内用凿岩机钻水平孔,进行控制爆破。一般情况下,凿岩爆破分层进行,逐渐延深达到分台阶高度。

第五节　开拓运输和装载

一、开拓运输

饰面石材矿山选择开拓运输方式的基本原则与其他露天矿相同,要求矿区的自然条件(包括地形、矿体赋存条件、工程地质及气象条件等)满足技术、经济的要求,包括开采规模、开采境界、开采程序、生产工艺、投资规模、生产成本等。应该指出,石材矿山的工作线布置、工作'线推进方向是根据能获得较高的荒料率的原则加以确定的。因此,开拓系统的选择和布置应尽量满足工作线布置和推进方向的需要。

饰面石材露天矿常用下述几种开拓运输方式:

(1)公路开拓汽车运输

这种方式有很大的灵活性和机动性,对使用条件没有严格的要求,能充分发挥装载设备的效率,是石材矿山广泛采用的方式。

荒料运输应采用载重汽车,不能采用自卸汽车,以保证平稳安全。

宜兴大理石矿采用履带式起重机吊装,台阶高度为 5m,其开拓系统如图 1 – 12。

(2)无沟开拓桅杆起重机吊运

这种开拓运输无需开掘从地表至开采台阶的运输沟道,而直接由桅杆起重机吊运至地面,装入运输设备。

桅杆起重机的位置是否合理,对吊运效率和经济效益有直接影响。合理酌位置应能充分利用起重机的工作规格,在其工作范围内直接吊运更多的荒料和废石,尽量减少牵引绞车或其他设备的转运量。当一台桅杆起重机不能满足吊运量或开采范围的要求时,可设置两台或更多,这时,位置的确定还应注意相互间工作范围的衔接以及与运输线路

的联系。

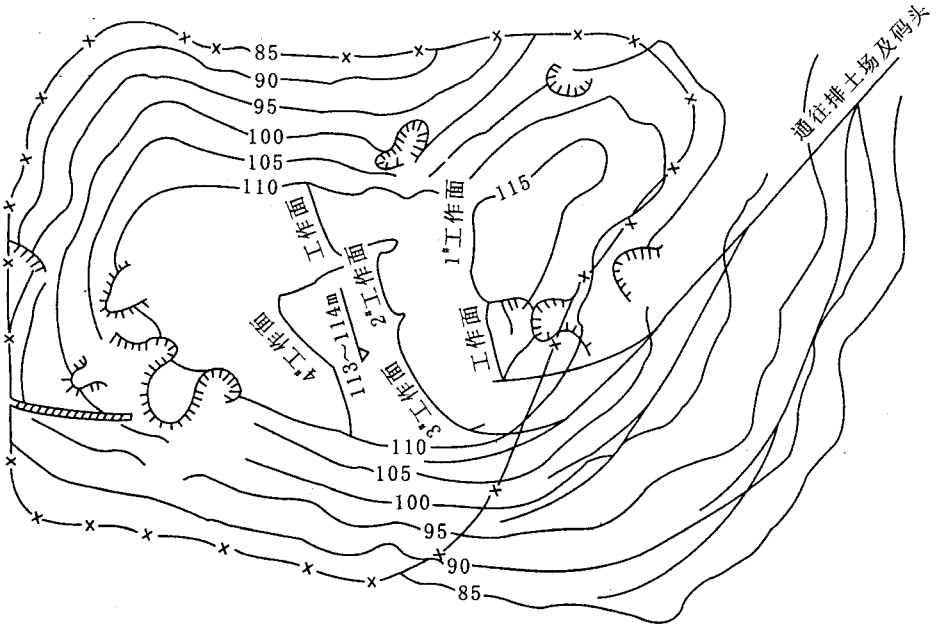


图 1－12　宜兴大理石矿开拓系统

由于受桅杆起重机工作规格和提升能力的限制，这种开拓运输方式适用于采场面积较小、开采深度不大、矿岩运输量较小的矿山。目前生产的桅杆起重机工作半径最小为50m，起重高度最大为 65m。

这种方式的开拓工程量较小，投资少，同一设备完成矿岩的提升与装载，凡符合适用条件的矿山，能获得较好的效果。

广东连县大理石矿采用无沟开拓桅杆起重机吊运，该矿 464m 水平以上为山坡部分，以下为凹陷部分。最高开采水平为 496m，最低开采水平为 420m。全矿采用两台桅杆起重机吊运，汽车运输。桅杆起重机站立水平及装车平台前期设立在 472m 水平，后期设立在 464m 水平，见图 1－13。

（3）公路汽车与桅杆起重机联合开拓运输

露天采矿场上部采用公路开拓运输，深部采用桅杆起重机吊运，在两者衔接处设装载平台。这是上述两种方式的结合，发挥了各自的优势，扩大了使用范围。这种联合开拓运输方式在石材矿山应用相当广泛。

莱州银磊大理石矿的山坡部分采用公路开拓汽车运输，深凹部分由桅杆起重机吊运至装载平台装车，见图 1－14。

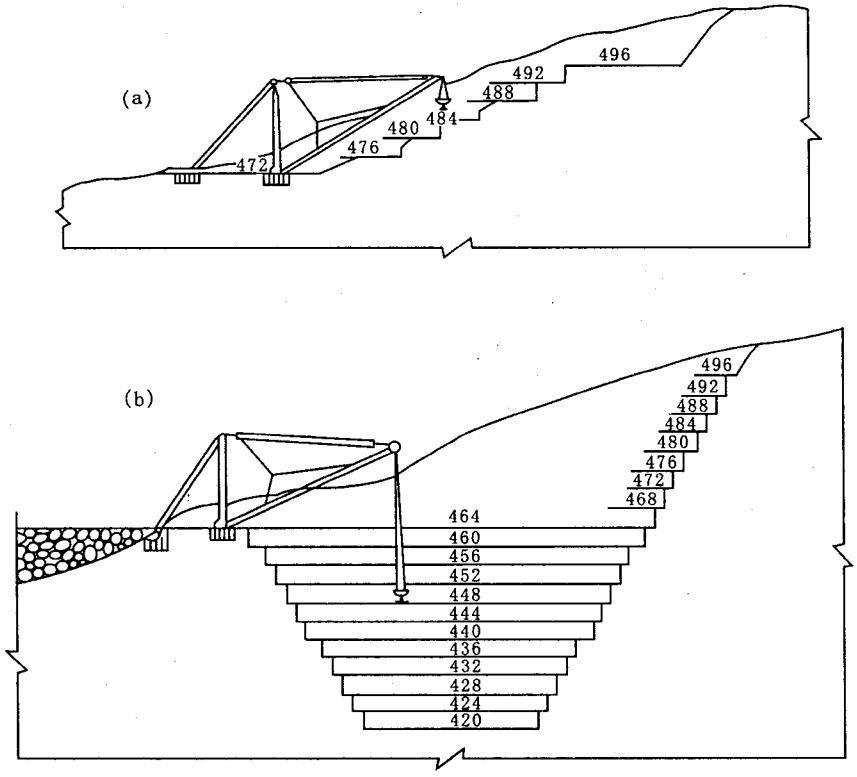


图 1－13　连县大理石矿吊运示意图

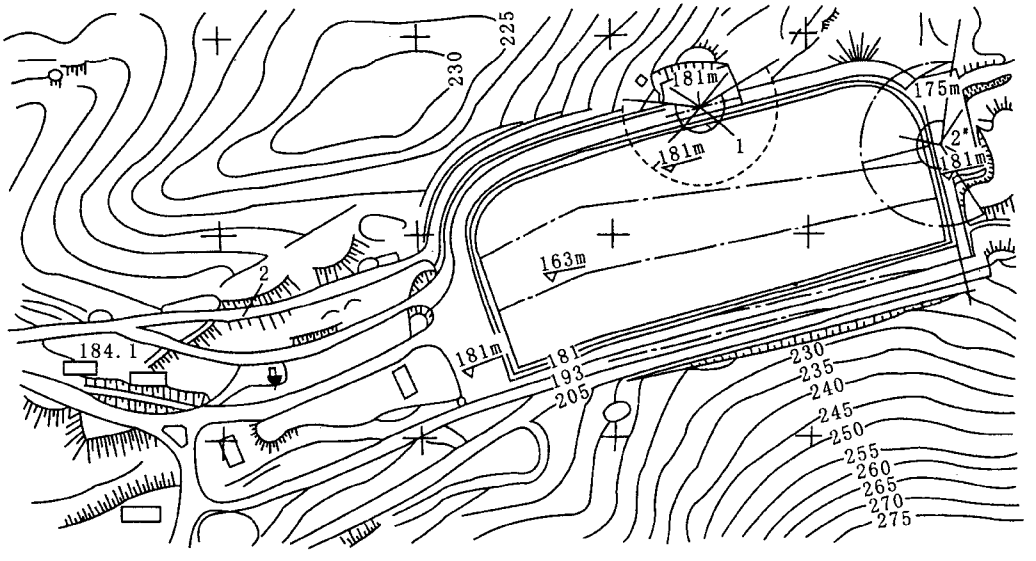


图 1－14　莱州银磊大理石矿开拓系统

（4）斜坡卷扬机道开拓台车运输

卷扬机道的布置和提升计算与其他矿山相同，但是，为了荒料运输的平稳安全，卷扬机道倾角不宜大于35°～40°，轨距一般大于900mm。

这种方式适用于规模小、地形复杂、比高大的山坡露天矿。

二、荒料的装载

荒料装载设备有固定式和移动式两类。

桅杆式起重机为固定式装载设备，有斜撑桅杆式和缆索桅杆式两种，后者应用较少。这类吊装设备工作半径大、起重高度大、起重量大，兼有装载和提升运输两项功能，可大大减少开拓工程量，是石材矿山比较理想的吊装设备。若矿山开采范围大，可在工作若干年后移设起重机。由于起重机的移设需要较多工程量和时间，故不宜频繁移设。起重机工作范围外的荒料，可借助慢动牵引绞车拖拽或用前装机、推土机等设备运送至工作范围内进行装载。

履带式起重机和轮胎式起重机为移动式装载设备。这类设备移动方便灵活，但工作半径、起重高度和起重量都较小，不适于大规格荒料的装载，台阶高度受到很大限制。需要指出，台阶高度不仅受装载设备起重高度的制约，而且由于分台阶需要有一定宽度的工作平台，所以在很大程度上是受装载设备工作半径的制约。这类移动式起重设备的起重量与工作半径有关。装载半径增大时，起重量大大减小。采用这类设备，通常配备慢动牵引绞车辅助牵引。

在生产规模小、荒料规格小的矿山，可用手动葫芦进行装载。

国外有不少石材矿山采用装载机进行装载，方便灵活。如美国卡特波勒公司生产的98GB型装载机，可完成装运、顶翻荒料、铲运废石等作业，一机多用，是矿山装运的理想设备。

三、各废料的装载与综合利用

大块废料的装车与荒料装载相同，用起重机直接装车，必要时辅以慢动绞车或其他设备。

中小块废料需要先装入容器，常使用的容器有钢丝绳编制的网和料斗。当废料分散不便装入容器时，可用人工推车、前装机、推土机集中后再装入容器。

有的矿山用前装机直接将废料装入汽车。

当前饰面石材矿山废料的综合利用方向是生产石米、填料、人造板材，以及加32-Z艺美术品。

第六节　花岗石的锯切开采

金刚石串珠绳锯开采花岗石矿，是实现环保开采的标志性技术之一。花岗石矿传统的垂直火焰切割端部与水平排孔爆破相结合的工艺技术行将结束，在应用金刚石串珠绳锯切割开采大理石矿的技术及生产经验积累的基础上，意大利玛瑞尼（MARIM）公司研制成功适用于花岗石矿开采并在我国建立了多个节能型“超级大区”金刚石串珠绳锯开采花岗石的样板矿山，设备的技术革新使得在花岗石矿山进行环保开采变为现实。

一、技术特点

主要技术参数为切割速度每小时 2～4m^2，切割深度 10～20m，切割断面可成 90°直角。切割方式为垂直方向，水平方向，转 90°方向“盲切”方式。锯缝仅 1.1cm，大大减少了矿产资源浪费，具有无噪音、无粉尘、作业安全可靠、产量高、荒料规整无内伤、出材率高、售价高等特点，适用于所有花岗石矿山。

二、生产成本分析对比

（1）采用金刚石串珠绳锯切割花岗石断面

设备总功率为 25kW。设金刚石串珠绳价格为 600～700 元/m，以每米绳的平均使用寿命为 8m^2 计算，则平均成本为 75～87.5 元/m^2。

（2）采用火焰切割机

设火焰切割机柴油消耗，40～50L/h，柴油价格为 2.85 元，切割速度为 1m^2/h，则平均成本为 114～142.5 元/m^2，浪费资源为 0.25～0.3m^3/m^2。

技术经济分析对比表明，采用金刚石串珠绳锯进行花岗石开采不仅经济上合理，而且社会效益和环保生态效益符合可持续发展原则，应大力推广。

第二章　宝玉石开采与矿物保护性开发

第一节　宝玉石开采

一、宝石与玉石

国内外习惯上把可以用作装饰品、工艺品和纪念品的各种矿物、岩石原料称为宝石。广义的宝石包括宝石、玉石、印章石、砚石、有机宝石和人造宝石。

(1)宝石

现代宝石的含义是指色彩艳丽、透明度高、硬度高(一般在莫氏硬度7度以上)、化学性质稳定,经加工琢磨可制作首饰和工艺品的矿物单晶。主要的宝石有金刚石、红宝石、蓝宝石、祖母绿、海蓝宝石、绿宝石、金绿宝石、碧玺、尖晶石、紫牙乌、黄玉、锆石、橄榄石、水晶、长石等。

宝石具有的三个特点是:产量稀少,价格昂贵;光艳夺目,晶莹瑰丽;质地坚硬,经久耐用。

有机宝石有珍珠、琥珀、珊瑚、煤晶、象牙等。人造宝石有合成红宝石、合成蓝宝石、合成祖母绿、合成钻石、合成水晶等。

(2)玉石

适用于雕琢玉器、制作首饰和工艺品的岩石称为玉石。玉石通常为单矿物或多矿物的集合体,常为致密块状,质地细腻、坚硬,透明至不透明,莫氏硬度为4~7,具有各种鲜

艳的颜色。美丽、坚固、稀少是玉石的三个特点。常见的玉石有翡翠、软玉、蛇纹石质玉石、绿松石、青金石、欧泊、玛瑙和玉髓、独山玉、石英岩玉石、木变石、虎睛石等。

(3)雕刻石

雕刻石指莫氏硬度小于4的适于雕刻工艺晶的岩石。按其经济价值和工艺特点分为:印章石(寿山石、昌化石、青田石、巴林石、东兴石等),砚石(端砚石、歙砚石、洮河砚石、鲁砚石等),装饰石(大理石、汉白玉等)。

二、宝玉石资源的分布

宝玉石的化学成分复杂,矿床成因类型多样。伟晶岩是富产宝石的岩石,从伟晶岩及其次生砂矿中开采获得的宝石矿物及其变种已有40余种。

(1)国外宝玉石资源的分布

国外大型宝玉石矿主要集中在非洲、亚洲、南美洲和澳洲。

亚洲有世界最优质、最丰富的红宝石和蓝宝石。亚洲是驰名世界的翡翠(缅甸)和软玉,质地最好的金绿宝石、绿松石和青金石以及锆石宝石的唯一产区。泰国、柬埔寨、越南、老挝、缅甸和斯里兰卡盛产红宝石、蓝宝石和尖晶石等。

非洲盛产金刚石(南非、扎伊尔、博茨瓦纳)、红宝石、蓝宝石、祖母绿、海蓝宝石、紫晶等。

南美洲盛产祖母绿、海蓝宝石、碧玺、黄晶、紫晶、玛瑙等。哥伦比亚是祖母绿第一大生产国。巴西集中了世界海蓝宝石产量的70%,彩色电气石产量的50%~70%。

澳大利亚盛产钻石和欧泊。

(2)国内宅玉石资源的分布

我国宝玉石资源集中在九个成矿带(区):阿尔泰成矿区产出海蓝宝石、碧玺、金绿宝石、黄晶、水晶等;天山成矿带是我国最重要的天河石产地,还产出丁香紫、碧玉和海蓝宝石等;昆仑—祁连成矿带产出红宝石、蓝宝石、和田玉、柴达木玉、岫玉、祁连玉、墨绿玉、乐都五等;滇缅成矿带产出海蓝宝石、紫晶、碧玺、烟晶、孑L雀石、玛瑙等;内蒙成矿带产出海蓝宝石、绿碧玺、绿玉髓、绿松石、水晶、紫晶、软玉、鸡血石、玛瑙等;华东成矿带产出金刚石、红宝石、蓝宝石、紫晶、叶蜡石等;两广—海南成矿带产出红宝石、蓝宝石、南方玉、锆石、金红石、尖晶石等;秦岭成矿带产出绿柱石、虎睛石、鹰眼石、紫晶、独山玉、绿松石、密玉等;松辽成矿带产出金刚石、岫玉、刚五、长白玉、玛瑙等。

三、宝玉石的鉴定

俗话说黄金有价玉无价。宝石和玉料在质地、颜色上的差别可带来价格上的千差万

别。宝玉石鉴定是一项技艺高超、责任重大的特殊技术。

宝玉石的鉴定包括真伪鉴定、质量评价和价值评价三方面，大致分为四个步骤：

（1）肉眼鉴定。这是宝玉石鉴定的基础，通过肉眼对宝玉石的颜色、透明度、光泽、色散、特殊的光学效应、包裹体的特征等观察，对所测宝玉石样品有一个初步的判断。

（2）有效而简便的仪器检测。根据从简到繁的原则，选择合适的仪器检测与验证上述判断。

（3）稳定的物理常数验证。对宝玉石稳定不变的常数如密度、折光率、包裹体的特征等进行测定。

（4）签发鉴定证书。鉴定结果必须有三个以上的测试数据，如折光率、二色性、密度、可见光吸收光谱、包裹体的特征等，宝石的发光性仅作参考，数据必须可靠。宝玉石鉴定书具有法律效力。如鉴定有误，可向有关当局投诉或由鉴定机构赔偿经济损失。

四、宝玉石的开采

国外宝玉石矿多分布在发展中国家的边远荒凉地区。由于原生矿床所含宝玉石原石太少，极难开采。有商业价值的矿区多是冲积矿。多数宝玉石矿床未经评价就开采，基本上是选择性开采。除金刚石矿以外，其他宝玉石矿的开采规模都很小，且要等到对该宝玉石有较大的需求时才开采，技术落后，资源破坏严重，经济效益低下。在工资水平高的地区开采宝玉石很难赢利。

我国开采宝玉石矿床手段比较落后，有的宝玉石原生矿床采用岩石炸药开采，资源破坏严重。应大力采用先进技术，实行保护性开采。新疆玛纳斯玉石矿禁止在距玉石数米内使用岩石炸药；剥离围岩寸对炮位和用药量严格控制；对较大玉料进行破料时，或采用黑火药、膨胀剂破料法取玉时，尽可能按岩石的节理面破开，以提高产量，保护资源。

（1）宝玉石的露天爆破开采

南非的科丰坦金刚石矿、芬什金刚石矿和我国的蒙阴金刚石矿金伯利岩管的浅部均采用常规的凿岩爆破方法进行露天开采。

（2）宝玉石砂矿的露天开采

①采砂船开采。采砂船是一种漂浮在水上的砂矿采选联合装置。20 世纪 60 年代曾用水力吸扬式采砂船在南非和西南非洲大西洋沿岸浅海开采金刚石。

②机械开采。露天宝玉石砂矿可采用多种挖掘机、运输机和推土机等设备进行开采。澳大利亚新英格兰矿区蓝宝石砂矿床开采，是在剥离表土后在砂矿层用反铲进行槽式采掘，将砂砾装入卡车运至加工厂，经回转式矿石筛分类，再经一系列脉动跳汰机，使

重矿物进入洗盘或洗矿槽,蓝宝石的回收率在90%以上。纳米比亚统一金刚石矿山公司在奥兰治蒙德海滩金刚石砂矿床每年开采大约400kg宝石级金刚石,采用的设备是轮斗式挖掘机、排土桥、排土机联合机组,以及刮斗、液压反向铲、推土机和拖运机等。先剥离厚度为5~25m的覆盖砂层,把含有金刚石的砾石揭露并挖掘出来,用电机车运至选矿厂,并人工清理基岩以搜寻散落在岩缝中的金刚石后,用剥离砂层回填采空区。

③手工开采。在缅甸、斯里兰卡、印度、泰国和加纳等地,采宝人淘洗砂砾,使相对密度较大的红宝石、蓝宝石沉在淘盘的下部,手选宝石毛坯。

(3)宝玉石的捡采

①一般捡采

在含有宝玉石的砂、泥土、砂砾坑、冲积层和废石堆等处都可以捡采到宝玉石。

含宝玉石的岩石风化后,留下了质地坚硬的宝玉石。在沙漠地区,玉髓、碧玉和翡翠等被风砂研磨得异常光滑从而易于辨认;在潮湿地区由于泥水和苔藓的覆盖则难以分辨。在某些采集砂砾石作为建筑材料的场所,在潮湿的卵石堆上可发现玛瑙等宝石。

夜间可用紫外线灯照射的方法发现发荧光的宝石。南非的公司派工人在海边沙滩上列队爬行采集金刚石。

②和田玉的捡捞

我国和田有久远的从河道中拾取玉石的历史,称为"拾子玉"。和田的玉龙喀什河和喀拉喀什河是世界上有名的玉河,源于昆仑山,上游有多处原生玉矿床,河里盛产白玉、青玉、墨玉和碧玉。上游地势险恶,很难到达,捡玉和捞玉主要在中游。夏季气温升高,冰雪融化,河水暴涨,原生玉矿经风化剥蚀后的玉石碎块被洪水冲入河中,随河水奔流而下,当流速变缓时堆积在河滩和河床上。捡玉和捞玉主要在秋季进行。自和田王到前清时代,长期实行官采。平时封禁,到拾玉时节,派官员带官兵层层把守,监督民夫在河中列队捡捞玉石,全部收缴。至清嘉庆四年(1799年)才开玉禁,许可民采。

河流中下游的子玉块度不大,多在0.2~1.5kg之间。从上述两条大河中每年拾到的子玉琢料不下10t。既有专业拾玉者,也有路过的拾玉人。专业拾玉者多是中老年人,家住玉河附近,手持带铁钎头的木棍或长把小镐头,沿河在卵石滩上往下游方向慢行,使目光与卵石倾斜面垂直,易于发现子玉。要随太阳方位变换方向,一般要背向太阳,使眼睛不受阳光刺激,能较清楚地判明卵石的光泽与颜色。多在河曲内侧的石滩、河道由窄变宽处、河心沙石滩上方的外缘处寻玉,这些都是水滚由急变缓处,有利于玉石的停积。一旦发现子玉,用钎头或镐头刨出。

捞玉应逆流寻找,以免弄浊河水,影响视线。

(4)宝玉石的露天开采

当宝玉石原生矿脉出露地表时,可进行露天开采。新疆于田县阿拉玛斯玉矿在古代开采的基础上,于1957年建矿,断续开采近30年。前三年露天手工开采白玉,以錾子、榔头、铁钎等凿石取玉,效率低,年采玉约3t。20世纪60年代露采与地采相结合,凿岩爆破,使用硝铵炸药,年采玉约3.5t。

(5)宝玉石的地下开采

①宝玉石的阶段自然崩落法开采。南非采用阶段自然崩落法开采金伯利岩管金刚石的矿山有布尔特丰坦矿、杜拖伊特斯班矿、韦塞尔敦矿、德比尔斯矿等,实现了降低开采成本的目的。

②坑道探采。原生宝玉石多赋存在岩浆岩或变质岩的晶洞内,古往今来,探险者与寻宝者在悬岩边,或进入山洞、旧矿坑内探寻晶洞,采集宝石。他们通常选择发现过宝石的地方进行探采。

阿尔卑斯山含宝石级透明水晶的晶洞岩石主要是花岗岩、片岩和片麻岩。含晶洞的岩石通常侧面峻峭。寻宝人观察悬崖下崩落的岩堆,觅求晶洞矿物的痕迹,然后仔细检查崖壁的水平裂缝,它们与石英脉的交汇部位可能出现良好的晶洞。确定合适位置后进行挖掘。当挖掘靠近晶洞时,铁锤击岩的响声由清脆变为沉闷。发现晶洞后,先移去泥土与杂物,仔细观察有无裂缝及其发展方向,用螺丝刀、凿子小心撬凿开晶洞。若晶洞充有粘土,可用手清除,同时观察粘土中有无晶体,若有,应将粘土冲洗检查;检查晶洞内有无松脱的岩壁,若有晶体则用手取出。寻找允许进一步拓展而对晶体伤害最小的裂缝,用撬杆逐渐撬剥岩石或晶体,把剥下的晶洞物质置于布袋内,冲洗捡选晶体。发现一个晶洞后,可能在其附近还会发现另外的晶洞。

澳大利亚绝大多数欧泊矿脉是以扁平状、片状夹杂在其他围岩中间,矿物分散。挖掘人选择一处打洞,深度为10~20m,遇到宝石就挖出来,否则另选一处再掘。

进入废弃矿坑内探采是一项十分危险的工作。由于尘土的遮蔽,常需用十字镐剥出新鲜岩石的碎片进行观察。在坑内可用紫外线灯照射的方法识别荧光类宝石,如琥珀、刚玉、萤石、石英和锆石等。

于田县阿拉玛斯玉矿在20世纪70~80年代进行硐采,凿岩机凿岩,硝铵炸药爆破。全矿设4个坑口,两个掘进巷道,两个掌子面采玉。玉料块度一般在3kg以上,5~20kg的占绝大多数,0.5kg以下的抛弃。年采玉约4t,丰年可达10t,欠年可无玉产出。

且末县塔特勒克苏玉矿有几个矿坑开采,从矿体附近或边缘剥离、凿岩和爆破,手选分级。1983年产玉料70.8t,是新疆产玉最多的矿山,主产青白玉和青玉。

为了保护玉石,我国已规定严禁放炮采玉,要使用保护性开采方法,用机械切割的工艺。

(6)宝玉石的副产采集

有色金属矿床可能伴生宝玉石矿物。例如阿尔泰山一个有色金属矿开采铍矿物时,发现其中透明的绿柱石晶体是极其珍贵的宝石祖母绿,于是从开采铍矿回收祖母绿的工作中大幅度提高了企业的经济效益。

第二节　矿物的保护性开发

宝玉石矿物和部分工业矿物如冰洲石、云母、水晶和石棉等,采出后经过加工即可出售,在工业与人民生活中得到广泛应用。它们的价格一般较贵,且往往与其晶体的大小和完整程度紧密相关,因此,对此类矿物实施保护性开采就具有了重要的意义。

一、矿物保护性开采的一般原则

(1)注意贵重矿物的识别与回收

通常颜色鲜艳、透明度高、硬度高的矿物都可能作为宝石,例如透明的橄榄石是绿宝石,鲜艳透明的电气石叫碧玺。在有色金属矿山的开发中,应注意对晶体矿物的识别、品质鉴定和价值评定,以便在开采中实施保护并采取合理的回收方法。

(2)加强对晶洞的保护

较大的矿物晶体多是在晶洞中产出的,因此,一旦在矿床开发过程中发现有价值的晶洞,应立即采取保护措施,防止出于好奇或争抢而乱敲乱砸,以便用特殊方法进行保护性开采。

(3)减少或避免爆破震动对晶体的损害

炮眼布置应尽量避开晶体富集带,采用小直径炮眼少装药、浅眼爆破、松动爆破、光面爆破、预裂爆破等控制爆破技术,采用弱性炸药等,尽可能采用静态膨胀剂代替炸药,或采用锯切的方法开采矿物晶体,减少或避免爆破震动对矿物晶体的损害。放炮前应铺设垫板,减少晶体崩落时的冲击破坏,在垫板上分选。

南非、俄罗斯等国家为了在开采中保护矿物如石棉、石墨、金刚石、云母等的天然晶体结构,对采矿方法、炮孔设计、炸药消耗量等进行了研究工作。俄罗斯提出加大炮孔间

距以减少单位炸药消耗量,改用堵塞爆破,控制多排爆破的数量,减缓炸药的爆速来减少云母在爆破中的损坏。

(4)选用能保护晶体的采矿方法与参数

自然崩落法用于金伯利岩管赋存金刚石的开采,不仅降低了生产成本,还基本上避免了爆破对矿物晶体的破坏。在开采工作面手选出矿物晶体,尽早予以保护。适当降低采场高度和矿石溜井的高度,以减少矿物晶体在自溜过程中的自磨损坏。减少矿物在运输过程中的装卸环节等。

二、冰洲石的保护性开采

高品质的冰洲石是贵重的光学材料。由于冰洲石性脆且具有完全解理,因此,在开采中应避免强烈震动和温度剧烈变化所导致的晶体开裂损坏。

(1)冰洲石的开采

冰洲石产于晶洞中。在晶洞有足够大的出口与外界相通的情况下,可直接进入晶洞开采冰洲石,否则就需先揭露晶洞。

①尽量采用非爆破的方法揭露晶洞。可采用锯切方法揭露晶洞,也可在晶洞口围岩上钻孔,用楔子劈裂围岩,或是往钻孔内装入膨胀剂胀裂围岩。在特殊情况下,可使用少量炸药对围岩进行松动性控制爆破。炮孔应距晶体 2m 以外,深度以 0.5 ~ 0.7m 为宜,一般用 300 克硝铵炸药,电雷管起爆,然后用撬棍撬开已松动的围岩,揭露晶洞。

②晶洞的避光与气温平衡。晶洞揭露后,应避免强光照射,并立即进行测温工作。若晶洞内温度与地面温度相差较大,应立即遮盖晶洞口,待晶洞内温度慢慢与地面温度接近后再继续揭露。一般冬季晶洞与地表温差大,不宜开采冰洲石。

③晶体的探察。晶洞揭露后,应了解晶洞的大小、形状、延伸方向、晶体在晶洞中的分布情况,以便进一步揭露和采掘。为了保护适于光学用途的优质冰洲石,可用明亮的手提灯照射晶体,反光强的晶体多是因晶体中有裂隙或包裹体所致,质量较差;反光弱的没有裂隙或包裹体,质量较好。

④晶体的采掘。若冰洲石晶体离开晶洞壁散落在晶洞中,可直接收集晶体。若晶体生长在洞壁上,应两人合作,一人托住晶体,另一人用凿子和小锤沿岩壁将晶体凿下来。若遇复杂的;晶簇不易一一取下时,则应连同原岩一起取下,搬到地面再行分离。单个晶体或晶簇的分割可用细齿的钢锯或不带齿的钢片割下。晶体采下后放在筐中,不得叠压,以免相互撞击。用帆布、毛毡等软物加盖筐子后存放在阴暗处,不可放在阳光下曝晒,也不能在冬天把冰洲石从室外立即搬进暖和的室内。晶体表面的泥土等污物宜于干

刷或用湿布擦去,切忌把晶体放在冷水中冲洗,几度温差就可能使晶体产生裂隙。非用水洗不可时,水与晶体的温度应相同。

(2)冰洲石的护晶

①温度保护。冰洲石采掘的临界温度为:冬季开采矿面气温不低于 -10℃,地表气温不低于 0℃;夏季开采矿面气温不高于 35℃,地表气温不高于 28℃。开采时电石灯不能接近晶体,开采出来的晶体应逐步升温,适应地表温度后才能移到遮光房或储存室内,晶体温差变化不得超过 1℃/h。

②避光保护。冰洲石在开采、出矿、运输与保管过程中,应避免强光直接照射和在阳光下曝晒。

③防震保护。开采作业中应降低对冰洲石的直接震动,运转的机械不能接触冰洲石晶体,运输前应进行软包装,不得发生摩擦与碰撞。

④出矿养护。在浅层晶洞内的晶体,要用细软的覆盖物掩盖 4~8h,待与外界气温相近后才能出矿。中层矿温度适应范围更小,需掩盖 21h 以上,用逐步适应的方法向洞外移动,待晶体温度稳定后出矿。深层矿较脆软,应分次、分时(4~6h)移动,每移动一次相应减少覆盖物,移动 6~8 次以后,待矿石性能完全稳定后方可出矿。

三、石棉和云母的保护性开采

石棉纤维的长度是衡量石棉质量的重要标准之一,纤维越长,使用价值越高。四川石棉矿的纵纤维石棉最长达 2.2m,是世界上最长的石棉。石棉纤维的抗拉强度较大,没有损伤的优质石棉纤维,其抗拉强度比相同断面钢丝的抗拉强度还大。如果石棉纤维扭折损伤,其抗拉强度显著降低,使用受到影响。因此,在开采过程中必须特别注意不要损伤石棉纤维。为此,应采用能在回采工作面人工选出长纤维的采矿方法,以采出更多的优质矿石。

云母晶体的有效利用面积是衡量其质量的一项重要指标。工业原料云母是指两面平整,有效利用面积不小于 $4cm^2$ 且无裂纹、无穿孔等缺陷的云母晶体。显然,云母晶体有效利用面积越大,其使用价值越高,故应采用工作面可进行人工手选的采矿方法。在回采过程中尽量保护大块云母晶体不破碎成小块,是保护云母晶体的基本手段。

第三章　砂矿床开采

第一节　概　　述

一、砂矿床的分类

地壳中的原生矿床一经暴露于地表,就要受到大自然的风化、侵蚀、剥离、搬运、分选和沉积等一系列作用,使其形成碎屑沉积物,其中某部分沉积物中的有用矿物富集程度达到具有工业开采价值时,便成为砂矿床。

根据形成砂矿的搬运介质不同,砂矿床主要分为风成砂矿、冰川砂矿和水成砂矿三大类。

(1)风成砂矿

由于风力的搬运作用,在适合沉积的地貌条件下,堆积而成的砂矿。

(2)冰川砂矿

由含有用矿物的冰川泥砾,在随冰川迁移、融化的过程中沉积而成的砂矿。它又分为冰碛砂矿和冰水砂矿,前者矿物富集程度较差,后者矿物富集程度较好。

(3)水成砂矿

由于水的搬运作用形成的砂矿。其分布范围最广,种类也最多。按其成因不同可分为:残积砂矿、坡积砂矿、洪积砂矿、冲积砂矿、滨海砂矿等。其中以冲积砂矿和滨海砂矿最常见。

①冲积砂矿

由河流的搬运作用形成的砂矿。它一般多形成于河流的中上游地段，成矿地带一般是在河床由窄变宽、支流汇合、河流转弯内侧、河流穿过古砂矿、河床凹凸不平或河床坡度由陡变缓地带（图 3－1）。根据冲积砂矿赋存地带的地貌特征，冲积砂矿又进一步分为河床砂矿、河谷砂矿和阶地砂矿三种。

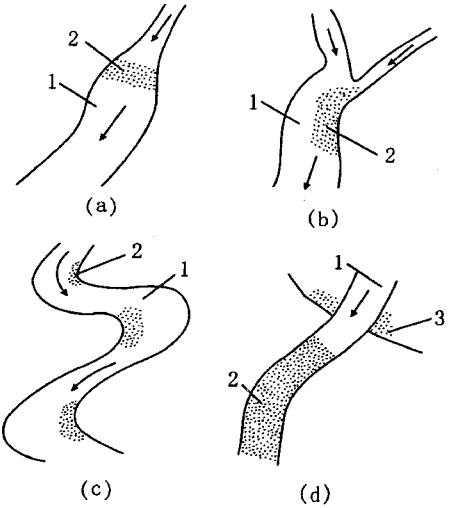


图 3－1　冲积砂矿几种富集情况

（a）河床由窄变宽；（b）主支流汇合；（c）河流转弯内侧；（d）河流穿过古砂矿

1—河流；2—砂矿；3—古砂矿

a）河床砂矿。一般产于现代河床底部，厚度一般不大，但延长较远。形成的有利条件是周围有原生矿体或早期形成的砂矿。

b）河谷砂矿。它是由河床砂矿演变而成的砂矿，是由于河道侧向迁移，使早期形成的河床砂矿露出水面或被冲积物覆盖的砂矿出露，一般产于河谷底部或附近的河漫滩冲积层内，埋藏深度变化较大，可由几米到几十米。

c）阶地砂矿。在地壳上升地区，河流下切作用强烈，由于河流逐渐加深，使没有受到河流侵蚀的早期河谷砂矿高出河床，形成了阶地砂矿。它一般分布在河谷两侧的阶地上。

②滨海砂矿

滨海砂矿平行于海岸分布，一般呈狭长条带形状，沉积于海水高潮线和低潮线之间。矿床中的有用矿物是由河流从大陆搬运而来，或海岸附近岩石受海水浸蚀而破坏，由海浪作用使它们在有利于沉积的地带富集而形成矿床。滨海砂矿主要矿产物是锡石、金刚

石和锆英石等。

二、砂矿床的地质特征

(1)砂矿床的埋藏特点

尽管砂矿床的类型很多,但它们都是分布在第四纪冲积地层中。共同的埋藏特点是:矿床成矿时期晚,没有受到成岩作用,矿岩松软,胶结性差而易于挖掘,品位一般较低,且矿化不连续,品位分布极不均匀。

(2)砂矿床的形状

由于成矿条件的复杂性,砂矿床的平面形状多种多样(图 3-2)。对于冲积砂矿而言,大多数矿床呈条带状沿河谷走向延伸。

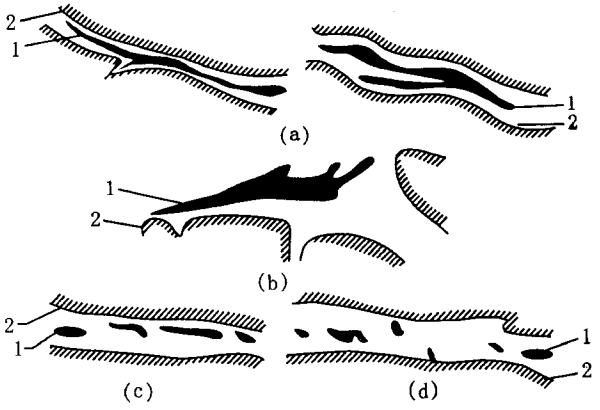


图 3-2　冲积砂矿的形态

(a)条带状;(b)不规则状;(c)串珠状;(d)鸡窝状;

1—矿体;2—河岸

(3)有用矿物的富集规律

各类砂矿都服从粒度大、密度大的物质沉积在下部,粒度小、密度小的物质沉积在上部的分布规律,地层顺序在垂直方向的排列大同小异。如常见的冲积砂矿地层顺序,由上至下一般是表土层、含矿层和基岩(如图 3-3)。

①表土层

覆盖于含矿层之上,为不含有用矿物或其含量不够工业品位的冲积物质,一般是由泥土层和砂层组成,厚度在几米到几十米之间。泥土层主要是腐殖土、淤泥、亚砂土和粘土等。砂层主要是由粒径为 0.01~1.0mm 的砂粒组成。

②含矿层

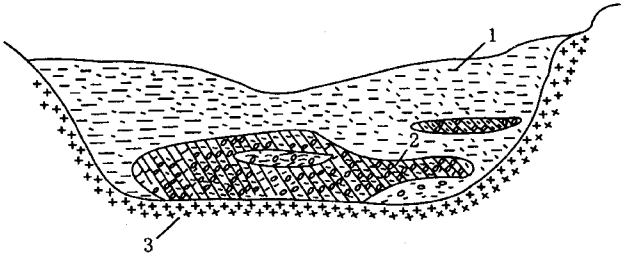


图 3－3　冲积砂矿地层

1—表土层;2—含矿层;3—基岩

位于表土层之下、基岩之上,有用矿物含量达到工业品位的冲积层称为含矿层。一般是由砂砾层和砾石卵石层组成,厚度一般在 0.1～3.0m。在含矿层与基岩的接触面以及风化基岩的裂隙中,有用重矿物富集,粗粒的重金属矿物通常赋存在矿床底板和基岩裂隙中。

③基岩

为冲积层之下较坚硬的岩石,一般是石灰岩、花岗岩、砂岩和页岩等。其表面是致密的粘土层,通常称为假底。

当基岩为石灰岩时,矿床底板常呈现凹凸不平,使矿床开采困难,这种底板也称喀斯特底板。

综上所述,在垂直方向上大部分重矿物主要富集在冲积层底部的砂砾层和砾石卵石层中,而在矿床底板或底板基岩裂隙中,通常是重矿物富集的地方。沿河谷走向重矿物的富集规律是:上游比下游含矿晶位高,矿床宽地段比窄弯处含矿品位高,主支流汇合的下方处含矿品位较高。

第二节　砂矿床开采设备

一、采砂船

采砂船按其挖掘方式不同,有链斗式、抓斗式、吸扬式和铲斗式四种。目前在内陆砂矿和大陆架砂矿开采中,应用最多的是链斗式采砂船。按其行走方式不同,又分为桩柱式采砂船和钢绳式采砂船。现以桩柱式链斗采砂船为例介绍采砂船工作原理。

桩柱式链斗采砂船(图 3－4)的挖掘装置是一条由许多挖斗组成的挖斗链 2,工作时它被上导轮的主驱动 14 带动回转,当上导轮转动时,斗链由斗桥 1 上的托辊和下导轮 3 引导,以一定的速度围绕上下导轮及斗桥运转,挖斗在重力作用下插入矿岩,并将其挖掘上来。斗桥的上端固定在由两个轴承座支撑、并与上导轮同心的支撑轴上,因此斗桥连同斗链可以在垂直面上绕支撑轴上下摆动。斗桥的下端由钢绳通过提升斗桥滑轮组 5 悬吊在前桅杆 9 上,钢绳的另一端绕在起落斗桥的绞车上,斗桥的悬吊装置可以调整和保持斗桥在需要的挖深层位上挖掘土岩。在船的尾部有两个用以固定采砂船的桩柱 22。船工作时,其中一个提起,称非工作桩,另一个下放并插入尾砂堆中,称工作桩。船工作时是以工作桩为圆心,在水面上作扇形的圆弧运动。因此,挖斗既有回绕上下导轮及斗桥的运动,又有以工作桩为中心的圆弧运动,是一种复合运动。挖斗挖掘的土岩随挖斗沿斗桥提升到上导轮处翻卸,并通过受矿漏斗卸入圆筒筛,进行冲洗、碎散和土岩筛分。筛上的砾石和杂物由砾石胶带机 20 排到船尾采空区。砾石胶带机是由传动装置 19 带动,并由砾石胶带机固定钢绳 18 悬吊在后桅杆 17 上。砾石胶带机可通过绞车 16 进行起落,调整高度。筛分下来的矿砂进入选别设备进行选矿,选别的细泥尾矿由尾砂溜槽 21 排弃到船后采空区。船的移动主要是靠两个桩柱 22 进行的,船移动前先将斗桥提升到水面以上,然后通过两个桩柱交替提升和下放,同时船配合进行往复回转,实现向前移动一个步距。船挖掘时,先放下斗桥,然后开动横移绞车,使斗桥由工作面的一角转到另一角。挖掘一个分层后,斗桥再下放一个分层厚度,开动反程绞车,向另一角回转并挖掘下一个分层矿岩。如此反复,由地表一直挖到砂矿底板为止。

综上所述,采砂船开采的工艺过程大致分为:挖掘、碎散筛分、选矿、尾矿排弃、移动进船等环节。

二、水力机械

(1)水枪

水枪是形成高压水射流对矿床进行冲采的主要设备。它主要是由枪筒、喷嘴、球形活动接头、水平旋转结构、上弯管、下弯管及稳流片组成(图 3－5),其中枪筒和喷嘴是水枪的关键部件,直接影响着射流质量的好坏。

(2)妙泵

砂泵是加压进行水力运输的主要设备。按结构原理,目前我国生产的砂泵分为离心式和往复式两类。离心式砂泵又分为卧式泵和立式泵两种。离心泵的特点是扬程较小,允许吸人的固体颗粒较大,一般适用于短距离管道运输。水枪开采的运输管道较短,因

此多采用离心式砂泵。我国常用的离心式砂泵的类型有：

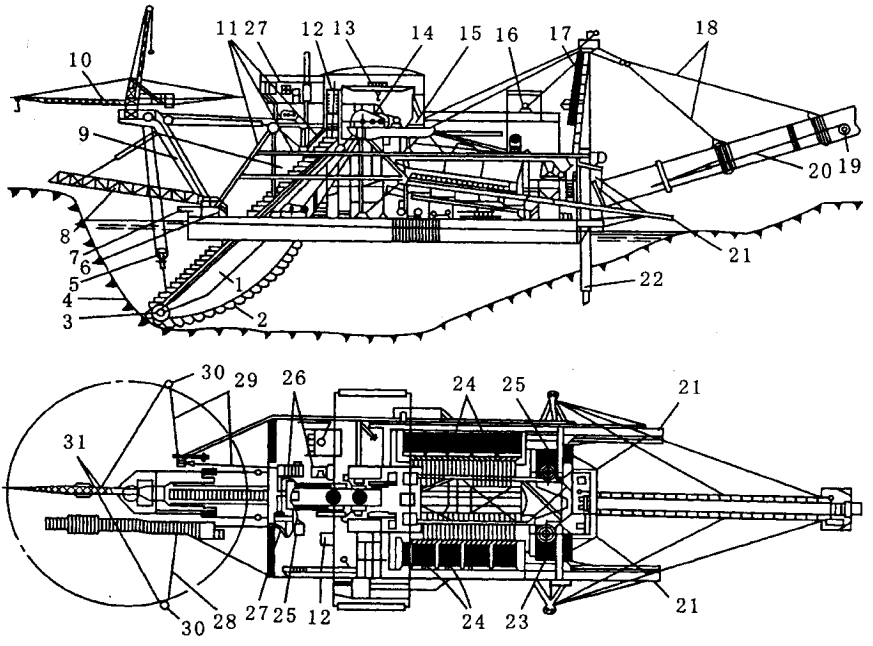


图 3－4　桩柱式链斗采掘船示意图

1—斗桥；2—挖斗链；3—下导轮；4—工作面；5—提升斗桥滑轮组；6—浮桥；7—水枪；8—土岸桥；9—前桅杆；10—艏起重机；11—主桁架；12—电梯；13—桥式起重机；14—主驱动；15—桩柱绞车；16—胶带机绞车；17—后桅杆；18—砾石胶带机固定钢绳；19—胶带机传动装置；20—砾石胶带机；21—尾砂溜槽；22—桩柱；23—精选跳汰机；24—粗选跳汰机；25—左横移绞车；26—右横移绞车；27—斗桥提升绞车；28—左横移钢绳；29—右横移钢绳；30—岸上滑轮；31—横移钢绳固定点

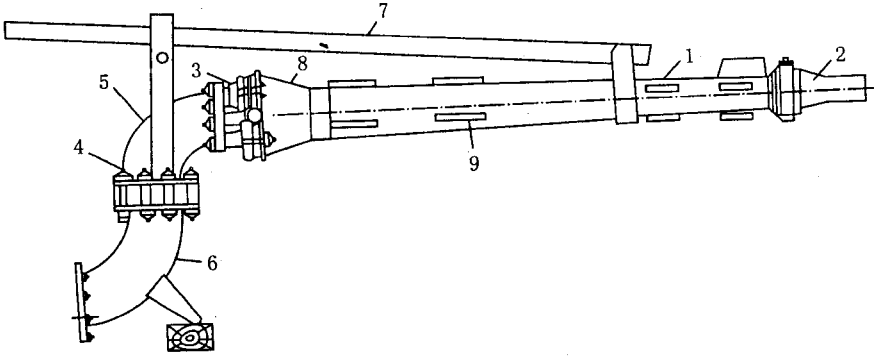


图 3－5　水枪外形

1—枪筒；2—喷嘴；3—球形活动接头；4—水平旋转结构；5—上弯管；6—下弯管；7—操纵杆；8—锥形管；9—稳流片

①平桂型砂泵。它是卧式单面进矿浆的离心式砂泵。在砂矿开采中,常用的是乎桂-125、150、200 型砂泵。主要优点是:叶轮片数少(3 片),允许通过固体粒径可达100mm,对矿浆适应性强;允许吸人矿浆浓度较高,一般液固比为 3:1~4:1。缺点是效率低,耗电量大。

②PN 型砂泵。特点是效率高(56%~65%),叶轮直径大,叶片数少,允许通过的最大固体粒径大,对矿浆适应性较强,能适应大规模砂矿开采的要求。

③PS 型砂泵。特点是结构紧凑,整个设备可以安装在滑橇式底座上,移动方便,对矿浆的适应性差,一般用于输排选矿厂的尾砂。

第三节　砂矿床开采方法

采砂船开采、水力机械开采和露天机械开采是砂矿开采的三种主要方法。

一、采砂船开采

采砂船是一种开采水下砂矿床或松散物料的浮动式采选联合装置。利用安装在乎底船头的挖掘机构采掘矿砂,并提升至船上的料仓,经圆筒筛的碎散、洗涤、分级后,筛下含矿的细粒物料自流进入粗选溜槽或跳汰机粗选,尾矿经尾矿溜槽或砂泵排于船尾后的采空区,圆筒筛上的废石经胶带输送机或砾石溜槽排于船尾后的尾矿堆上。由于此种漂浮装置最初在新西兰用于开采砂金,故得名“采金船”,后来还用于开采砂铂、锡石、金刚石、金红石、独居石、锆英石、硫磺、磷酸盐、煤、银、钛铁、含银铅锌矿、铁砂、铌、钽、钍等矿产和建筑用的砂子、卵石。凡是用采砂船开采有用矿物的方法统称为采砂船开采,简称船采。

实践表明,采砂船开采的作业成本约为水力机械开采成本的 80%,劳动生产率高 3~4 倍。装配式采砂船的出现,改变了采砂船只适合开采储量较大的砂矿的习惯认识。

随着开采技术条件的变化和环保要求,我国采砂船开采的排尾方式、回采工艺、开拓与采前准备、选矿工艺、采后复田等技术都在不断地发展和进步,经过多年不断的实践和总结取得了丰富经验。

(1)开拓

船采的开拓是指为采砂船的建造组装准备工作场地,并使船建成后能处于漂浮工作

状态,移进矿体进行回采。

①基坑开拓法

首先在矿体附近挖掘一个基坑,船在基坑中组建,挖掘一条通向矿床底板的通道,通道加深角一般为 7°~12°,建成后即出基坑。具有投资省、施工简单、供水容易等优点,一般适用于开拓埋藏位置低于潜水位的矿床,如河漫滩冲积砂矿。

②筑坝开拓法

当矿区水源不足时,或开拓埋藏位置高于河流水位的高漫滩砂矿和阶地砂矿时,常需要横向筑坝,以提高采池水位,使采砂船能够进入矿体进行开采。常采用普通坝开拓(图 3-6)和拦河坝开拓(图 3-7)。

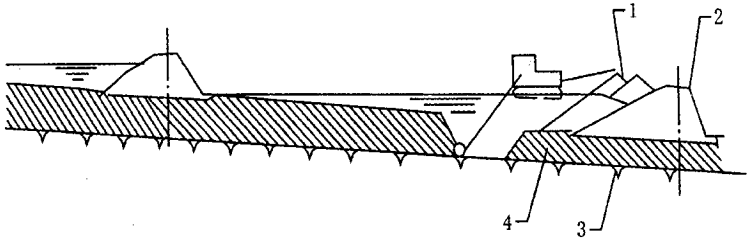


图 3-6　普通坝开拓

1—废石堆;2—坝;3—底板界线;4—矿体

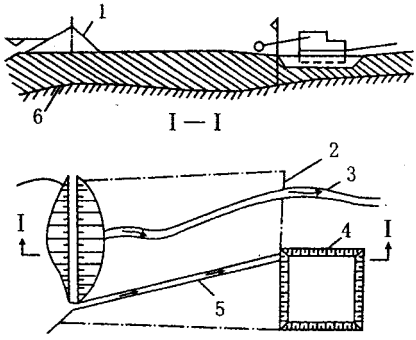


图 3-7　拦河坝开拓

1—拦河坝;2—矿体界线;3—河流;4—基坑;5—引水渠;6—底板

筑坝开拓的主要优点是:适应性强,能充分利用矿产资源;采池水位易满足船采的最小水位要求,船的排尾空间较大,可避免采砂船触堆搁浅,可减少采砂船因超挖底板而产生的挖斗严重磨损变形。缺点是:开拓筑坝工程量大,成本高。

当开采中需要提高的水位小于 1.5m 时,可直接利用采砂船排弃的尾砂和砾石围堰

来提高水位。此时只要将采池后面所有的溢流通道堵死,即可提高水位,称为围堰开拓法。

③阶段开拓法

阶段开拓法的实质是:当开拓埋藏位置较深、表土层较厚的矿床时,为降低船采的剥离成本、提高船挖掘砂的生产能力,借助其他采剥设备(推土机、铲运机、前装机等)剥离潜水位以上的表土,以发挥这些设备机动灵活和剥离成本低的优点,减少船的剥离量和船上采选设备的磨损。

(2)采准工作

采砂船开采前的采准工作主要包括:采区清理和表土剥离,采区供水、供电和生产勘探。在严寒地区还需预防冻结和解冻。

(3)回采工艺

①桩柱式扇形回采

采砂船的后部安装有两根桩柱,在工作时用其中一根插入尾矿,并以此为中心做横向扇形摆动,以获得横向进给,达到回采的目的。溜槽排出的尾砂直接排至尾矿场下部,主皮带运输机将筛上的砾石排弃至尾矿场上部。这种方法操作简单、工作可靠,但由于尾矿场宽度比回采工作面窄,造成尾矿堆高于采前地面,且细砂在底部,砾石在上部,对恢复农田不利。1980 年以前我国的采砂船全部是桩柱式扇形回采。

②首绳式平行回采

首绳式回采是用首绳采砂船进行回采的一种工艺。这种采砂船是以安装在艏绞车上的首绳牵引,依靠采砂船上的四根横移钢绳使采砂船产生横移运动进行回采。筛上的砾石直接从溜槽排至尾矿场底部,筛下的细砂尾矿通过尾矿泵直接排至尾矿场上部。由于首绳开采的工作面宽,排弃的尾砂铺散的面积大,且细砂和水混合弃填在尾矿砾石缝隙内,使尾矿平坦并充实,有利于复田。

这种单一首绳式采砂船的缺点是:生产时钢绳在工作中占地面积大,挖掘硬土岩时比桩柱式采砂船生产能力低。

③首绳桩柱联合回采

为了克服桩柱采砂船和首绳采砂船各自的不足,同时发挥两者的优点,我国设计出了首绳 - 桩柱式采砂船。即在首绳船后部增加一根固定锚桩和一台尾矿皮带机。排尾方式采用溜槽排出部分尾砂在下,主皮带机排弃的筛上砾石在中,尾矿泵排细砂在上的三层尾矿。可以根据具体条件灵活地单独使用首绳或桩柱回采,也可在同一采幅中联合回采,即挖中部时用首绳,挖角隅时用桩柱的混合式采砂船联合回采。这种宽工作面回

采新工艺,不但提高了采砂船挖掘效率,减少贫化,而且改进了单一首绳船挤压和损坏船上电缆,明显有利于复田。

(4)开采方法

采砂船开采方法的分类通常是按采砂船移动方向相对矿床走向的关系,以及采池中布置工作面的数目划分的。主要方法有单工作面开采法、多工作面开采法和联合开采法,它们又可细分为单幅纵向、单幅横向、双幅纵向、双幅横向、多幅纵向、多幅横向开采法(图 3-8)。

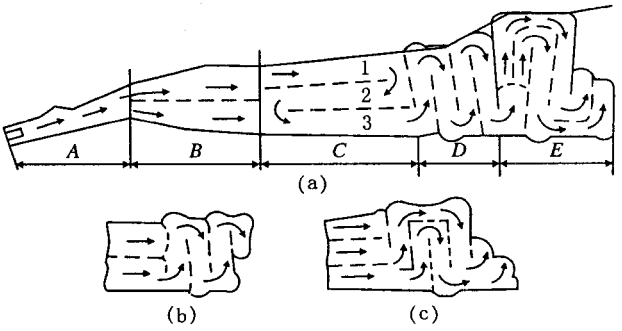


图 3-8　采砂船开采方法

A、*C*—单幅纵向;*B*—双幅纵向;*D*—单幅横向;*E*—双幅横向

①单工作面开采法

这种方法是以单一工作面在采池全宽范围内进行开采。单工作面开采宽度较窄,开采时无须在工作面之间频繁调船,故具有时间利用率高、生产能力大、船的调头和横移钢绳工作简单等优点。主要缺点是:排弃的废石分布不均匀,不利于复田。当开采埋深较大的矿床时,船排弃的废石易压采池一侧的矿体,进而导致采砂船开采侧部矿体时,产生矿砂的损失或贫化。根据船的开采移动方向是平行还是垂直矿体走向,单工作面开采法可分为单幅纵向和单幅横向开采法。

a)单幅纵向开采法

沿矿体走向上行或下行前进开采。当矿床宽度较窄时,可一次开采矿体的全宽。当矿床较宽时,应将矿床宽度划分成几个具有合适宽度的条带,依次按条带进行开采(图 3-9)。条带长度一般为 0.3~0.8km。采完一个条带后,船调转 180°,再开采相邻的条带。划分的条带数目应是奇数,以使采砂船能返回原来的方向继续向前开采。

这种开采法的优点是:开采时,调船工作简单灵活,遇障碍物(如冻土)时易于改变船的开采方向,故对于不规则矿体适应性较强;由于沿矿体走向一次开采长度较大,因此减

少了采砂船 180°调头时间,提高了生产能力,简化了技术管理工作。主要缺点是:当矿体界线不清时,开采存在较大的盲目性,易产生损失和贫化;当开采深埋矿床时,排弃的废石堆易压侧部矿体。

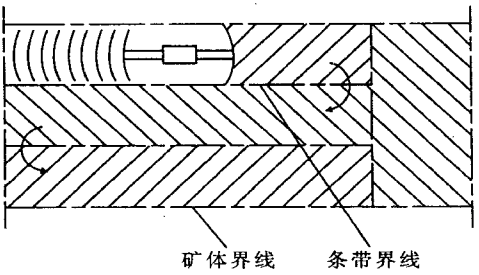


图 3-9　单幅纵向开采

b)单幅横向开采法

垂直矿床走向开采。主要优点是:可以保持较合理的挖掘宽度;对于边界不清的矿体,在开采过程中可进行边采边探,因此资源回收率较高;当开采中需要横向筑坝来提高采池水位时,可利用采砂船横向排弃的废石堆筑坝。主要缺点是:当矿体较窄时,船的 180°调头次数频繁,因此会占用较多的生产时间且管理工作复杂;当逆向开采时,由于尾砂堆的渗水性好,需补充较多水量以保持足够的水位。有时为保持采池的水位,需沿走向每隔一定距离留设横向保水矿柱,增加了矿柱损失。为减少采砂船 180°的频繁调船,要求矿床宽度大于 120~400m。一般来说,矿体宽度应为采砂船最小挖掘宽度的 2~4 倍。

②多工作面开采法

在采池的全宽范围内,采砂船以几个工作面轮流进行开采,工作面数目通常为 2~3 个,最多不超过 6 个。开采时,工作面之间应有一定的超前距离,其值一般为 2~4 倍的移步距。船的调动工作如图 3-10 所示。在点 1,船以右桩为工作桩开采工作面 5—6,当船向前推进 2~4 个移步距达 7—8 的位置时,便开始向相邻右工作面调动船,先将船停在 5—6 的位置,然后提起斗桥并把它放在点 6 的位置,提起工作桩,借助横移钢绳使船向右移动。在移动进程中,可以利用斗链的正转或反转,使船前进或后退来配合调船。最后将左桩放在点 3,调船工作结束。如此反复地来往于工作面之间进行开采。船每调动一次所需时间为 20~35min。

主要优点是:船排弃的废石均匀平整,有利于采后复田;当开采深埋矿床时,可减少因废石堆压侧部矿体而产生的损失和贫化。主要缺点是:来往于工作面之间的调船过于频繁,占用生产时间多且管理工作复杂;由于采池宽度较大,横移钢绳敷设工作较复杂;

由于排弃的尾矿堆较宽,采池渗透水量大。按采砂船开采方向平行或垂直于矿体走向,多工作面开采法可分为多幅纵向和多幅横向开采法。

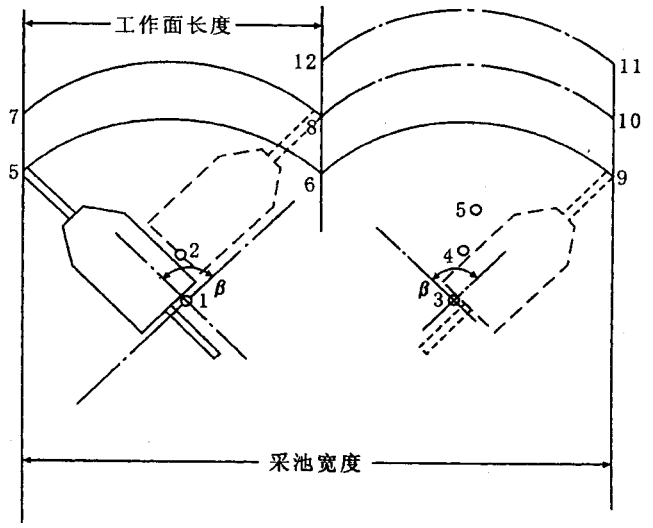


图 3－10　虹双工作面开采法

a)多幅纵向开采法

主要优点是:一次可采完矿体全宽,因此避免了因废石堆压矿产生的损失和贫化。主要缺点是:当矿体界线不清时,开采时易产生损失和贫化。

b)多幅横向开采法

主要优点是:当开采的矿体边界不清时,因船垂直矿体走向推进,在开采中能边采边探。缺点是:当矿床宽度较窄时,船 180°的调头次数频繁。多用于开采宽度大于 400m 的矿床。

③联合开采法

上述开采法的综合应用。根据各地段矿床宽度的不同,采用不同的开采方法,于是形成了联合开采法。

二、水力机械开采

利用水力依次完成矿砂的冲采、运输、粗选和尾矿排弃等全部采选生产作业的连续开采方式,称之为水力机械化开采,简称水采。水力机械开采的主要方法是水枪开采法,通常是借助多级水泵,将水加压至 0.7～15MPa,通过水枪形成高速水射流,冲采砂矿。在水射流冲击、渗透等多种作用下,矿砂被碎散,与水混合成一定浓度的浆体,经运矿沟(矿浆沟)、砂泵或水力汲运机运至粗选设备(溜槽、跳汰机或螺旋选矿机)进行粗选,尾矿

用自流或加压水力运输送至尾矿池排弃。

我国是较早使用水力机械方法开采砂矿的国家之一。20 世纪 60 年代,全国锡产量的 50%,黄金产量的 13%,铌、钽、锆、钛等产量的 90%是用水力机械方法开采的。

(1)开拓工作

水枪开采的开拓工作是指挖掘供安装设备的基坑或堑沟,开辟采矿工作面,建立供水、供电和水力运输等生产系统。主要有基坑开拓法和堑沟开拓法。

①基坑开拓法。在适当位置挖掘一个基坑,坑底标高应达到矿床的底板,设置砂泵和水枪,然后对矿床进行开采。这种方法一般是在矿床由下而上不具备采用自流运输方法运输矿浆时采用。

②堑沟开拓法。当矿区地形和矿床埋藏条件适合自流水力运输矿浆时,可采用堑沟开拓法。堑沟开拓是利用明沟掘进通达矿床,进而为矿浆的自流运输开拓出通道。堑沟的位置应根据地形和矿床赋存条件确定,尽可能使一个块段的绝大部分矿砂能自流进入运矿沟,并使掘沟工程量尽可能小。堑沟的坡度可根据自流运矿所要求的坡度确定。

(2)冲采方法

根据水枪射流的喷射方向与冲采下来的矿浆流动方向的相对关系,水枪开采法可分为逆向、顺向和逆 – 顺向三种冲采方法。

①逆向冲采法。这是水枪开采普遍使用的方法(图 3 – 11(a))。水枪位于工作面台阶下平盘,水枪射流垂直工作面,首先在工作面最下部掏槽,使上部的土岩失去支撑而塌落,然后再射流塌落下来的土岩,如此反复进行。射流形成的矿浆,逆射流方向流人矿浆池或运矿沟,然后借助自流或砂泵送往选矿厂。逆向冲采时,水枪射流垂直工作面,所以冲击力大、能量利用充分、冲采效率高、单位耗水量小。缺点是不能借助射流的力量将大颗粒物料冲离工作面。一般适用于矿床厚度大、土岩致密、矿浆易于流运的砂矿床。

②顺向冲采法。水枪位于台阶的上平盘靠近工作面处(图 3 – 11(b)),射流方向与矿浆的流运方向一致,可利用水枪射流推赶矿浆,并将大块砾石冲离工作面。缺点是由于水枪射流顺工作面,使水枪的有效冲击力大大减小,特别是台阶高度增大时,冲采面的坡面角小,射距增大,冲击力更小,冲采效率将明显下降,单位矿砂耗水量增大,也不能利用矿岩的重力崩落土岩。适用于矿床厚度 3 ~ 5m、土岩松散、胶结性差、含砾石较多难以流运的砂矿。

③逆 – 顺向冲采法。它兼有逆向和顺向冲采法的优点(图 3 – 11(c))。先采用逆向冲采法对工作面进行冲采,然后再顺向冲采残留在工作面附近的土岩。此时,由于射流方向与矿浆流运方向一致,改善了矿浆流运条件,因而冲采效率高,单位砂矿耗水量小。

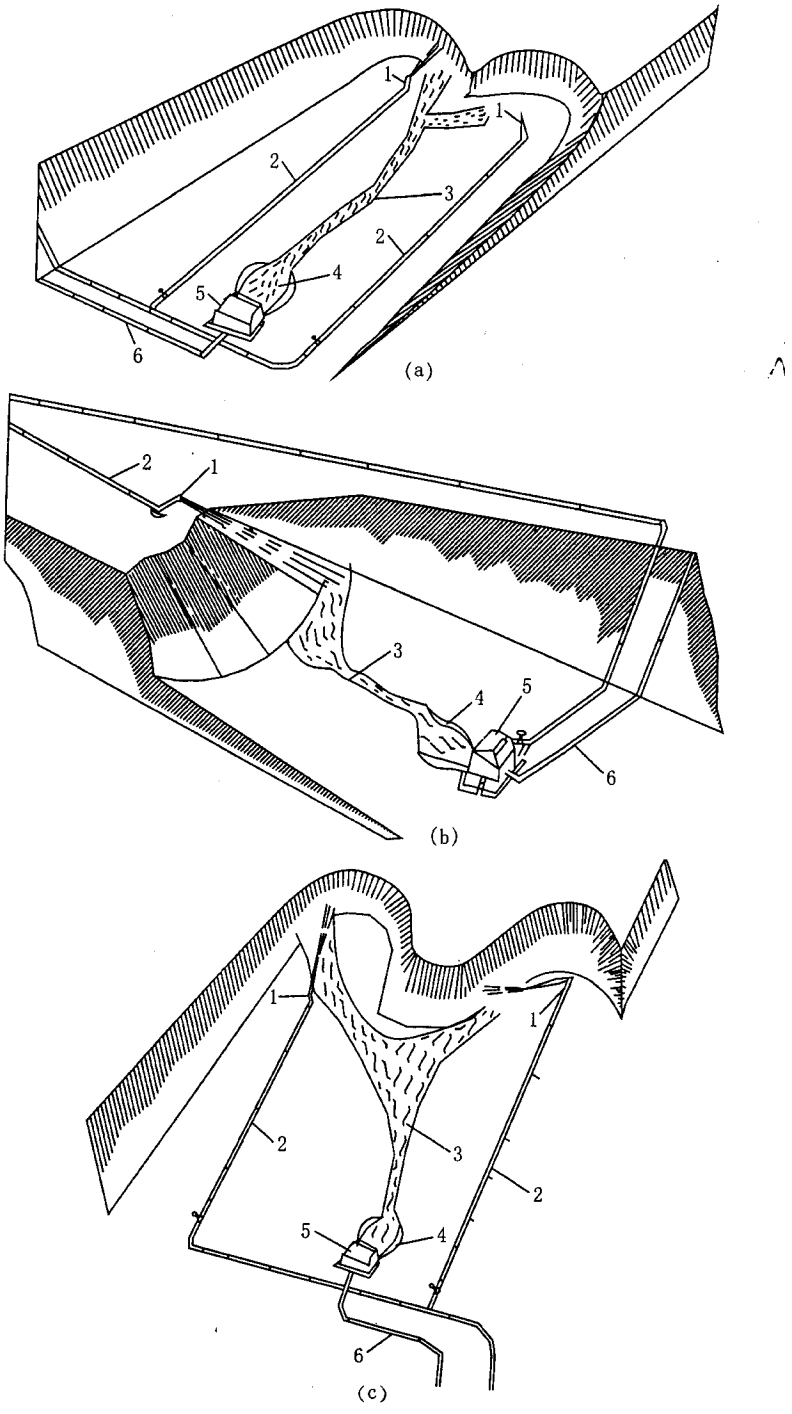


图 3－11　冲采方法

(a)逆向冲采;(b)顺向冲采;(c)逆－顺向冲采;
1—水枪;2—供水管道;3—矿浆沟;4—砂浆池;5—砂泵房;6—水力运输管道

水力机械开采砂矿或冲积土岩的主要特点如下:优点是准备工程少,建设速度快,机械化程度高,使用的设备简单,基建投资低;工艺连续,工时利用率高,生产能力大,劳动生产率高,作业成本低;技术比较简单和易于掌握,工作安全可靠;能为洗矿、选矿创造有利条件,有效地回收细粒矿物,回采率高。缺点是使用条件局限于能被低压水射流破碎的土岩;水和动力的消耗量大;受气候影响大,严寒地区作业期短;需认真考虑水系的污染和复田。

水力机械开采的使用条件是:沉积的次生矿床或土岩,有廉价的动力和充足的水源,有足够容量的尾矿池或水力排土场,无长期冰冻的气候条件。

三、露天机械开采

露天机械开采是指用推土机、挖掘机、前装机、铲运机、索斗铲等作为采运设备,并与洗选机组配合对砂矿床进行开采。

(1)前装机开采

前装机在砂矿开采中可作为采装矿岩设备、采装运矿岩设备、辅助设备。

①采装矿岩设备。挖掘较松散的矿岩,然后向汽车、窄轨铁路的矿车、皮带运输机受矿漏斗卸载。

②采装运矿岩设备。当运距小于 400m,或装卸循环时间不大于 3min 时,可利用前装机将挖掘的矿砂直接运往选矿地点。

③辅助设备。用前装机进行道路维护、筑堤修坝、平整场地、短距离牵引运送设备、清理积雪等工作。

前装机开采砂矿床具有投资少、见效快、机动灵活、一机多用等优点。主要缺点是挖掘力小,不适应开采较致密坚硬的砂矿,以及轮胎磨损快等。为克服上述缺点,前装机有向大功率、大斗容方向发展的趋势。

(2)机械铲开采

采用正向机械铲开采砂矿的方法主要有机械铲－窄轨铁路开采法和机械铲—汽车运输开采法两种。

①机械铲－窄轨铁路开采法。利用机械铲挖掘土岩并装入矿车中,通过窄轨铁路运出。

②机械铲－汽车运输开采法。利用机械铲挖掘土岩并装入汽车运出。开采时可利用推土机配合机械铲采装矿砂。

机械铲开采法适用于开采干旱少水的砂矿床,具有安全可靠、挖掘效率高、对致密坚

硬土岩或含巨砾较多的砂矿床开采适应性较强等优点。主要缺点是不适合开采湿度较大的矿床,它可导致设备沉陷、机械铲粘斗、汽车打滑等现象,致使采运设备的作业效率显著降低。

(3)索斗铲开采

索斗铲开采法有直接捣堆法和联合开采法。它们的选择主要取决于砂矿床的宽度和埋深,以及所采用的索斗铲型号。

①直接捣堆法。索斗铲把挖掘的表土直接排弃到开采境界外或直接排弃到采空区,把矿砂挖卸到矿车内运出。

②索斗铲－推土机联合开采法。当矿床宽度较大时,为减少索斗铲捣堆量,可采用其他机械设备配合索斗铲联合进行开采。

索斗铲开采砂矿的优点是:它可以站立在地表向下挖掘松软土岩,且挖掘范围较大;对湿度较大的矿砂适应性强,并能直接挖掘水下有用矿物;由于索斗铲卸载半径大,可直接将剥离的废石排弃到排土场,开采工艺简单;工作时无振动和冲击,设备部件磨损小,维修量小;功率大,挖掘效率高。

总的来说露天机械开采具有投资少、见效快、机动灵活等优点。目前我国应用露天机械开采砂矿床的比例已超过20%,并有逐渐增长的趋势。

露天机械开采一般适用于中小型矿床,特别是干旱缺水地区的中小型砂矿床。

第四章　化学溶浸开采

第一节　化学溶浸开采及其分类

化学溶浸开采是通过溶浸液与矿物的化学反应，选择性地溶解矿石中的有用组分，并在反应区内提取有用组分浸出液的开采方法，简称化学采矿（Chemical Mining）。与常规采矿的本质区别在于溶浸采矿的基本过程是物理化学和生物化学过程，是融地质、采矿、湿法冶金、环境工程等于一体的综合性技术，是多学科交叉和渗透发展的结果，是采矿科学发展的新领域、新方法，是矿产资源开发的巨大进步。突出的优点是投资省、工艺简单、成本低、见效快，可开采低晶位矿石，扩大矿产资源利用范围，减少对环境的污染。

一、常用名词术语

浸出过程中使用的浸矿溶液称为溶浸液。配制溶浸液的化学药剂称为浸矿剂。浸矿得到的含有用组分的溶液称为浸出液，其中已达到合格含量的称为产品液，又称富液或贵液（含金、银者）。溶浸液与被浸金属矿物发生化学反应产生的新化学物质称为反应生成物。

在溶液中发生由高浓度向低浓度方向的物质转移，并逐步达到均匀的现象叫扩散。

溶液在多孔介质中（如砂岩）的流动称为渗流。根据达西定律，溶液渗流流速的表达式为：

$$u = kJ \tag{4-1}$$

式中　u——渗流流速，m/d；

J——流程范围内的水力坡度；

k——渗透系数，m/d。

溶解到溶浸液中的有用组分数量与浸出前矿石中有用组分总量的百分比叫做有用组分的浸出率。

单位矿石（t）所消耗的溶浸液量（kg）叫做溶浸液单耗量。

溶浸液向矿石堆淋浸所能到达矿石堆的边界线与水平面的夹角称为溶浸角，溶浸角一般为 70°～80°，该界线以外的区域称为溶浸死带。

二、化学溶浸开采的分类

根据浸出工艺和方法的不同，可把化学溶浸开采分为以下四种：①堆置浸矿法。分为非筑堆浸矿法和筑堆浸矿法。前者是指进行堆浸之前没有筑堆和破碎工序，直接向露天排矸场的低品位矿石和废石淋浸溶浸液进行浸出；后者是指淋浸之前进行必要的矿石破碎、堆浸场地修整和筑堆等工作。②就地破碎浸矿法。用爆破或地压手段将矿石就地进行破碎，然后对破碎矿石淋浸。③原地浸矿法。特点是向矿层注入的溶浸液与没有经过任何位移的非均质矿石接触，完成化学反应，有选择地浸出有用组分。④联合浸矿法。用两种或两种以上的浸矿法联合回采一个矿块。

第二节　化学溶浸开采的基本原理

一、溶浸开采中的物理化学现象

（1）浸出阶段

溶浸液以液、气两相或液相周期地与固相矿石接触，与矿石中的一些矿物发生化学反应，使有用组分从固相转移为液相。

（2）有用组分的浓集纯化阶段

溶浸液中有用组分的浓度一般较低，可以用沉淀、吸附、萃取、电解、置换等物理化学方法，使有用组分浓集和除去杂质。要创造条件，保持有用组分在溶液中的稳定性，把杂质从溶液中分离出去。

（3）从合格液中回收产品阶段

通过结晶、电解等方法从溶液中析出有用组分，使其成为单质金属或化工产品。选择浸矿剂的重要前提是使金属离子稳定在溶液中。要创造条件破坏有用组分在溶液中的稳定性。我们着重讨论浸出阶段的问题，其中的物理化学问题很复杂，主要是反应平衡与反应速度问题，前者属浸出过程的热力学问题，后者属浸出中的动力学问题。

二、化学热力学基础知识

浸矿过程中，发生在水溶液中的化学反应与体系的电位和溶液的 pH 值有关，广泛应用金属水系（$Me-H_2O$）电位 - pH 图说明金属（如铀、铜、金）的浸出反应过程，这种关系可由电位方程（能斯特方程）表示：

$$aA + mH^+ + ne = bB + cH_2O \tag{4-2}$$

式中　A——反应物；

B——生成物；

a、b、c、m——分别为参与反应的各物质系数；

n——电子转移数；

e——电子。

上式说明，溶浸液欲与某金属（如铀）氧化物发生化学反应，必须具备两个条件：一是要具有一定的氧化—还原电位，使低价金属氧化成高价金属；二是酸浸时要具有一定的酸度，即溶液中反应物和生成物的浓度随，电极电位和酸度而变化。

根据化学热力理论，化学反应中的吉布斯自由能的变化只与反应的初始状态和最终状态有关，而与过程无关。故

$$-\Delta G = RT\ln K_a - RT\ln \frac{a_B^b a_{H_2O}^c}{a_A^a a_{H^+}^m} \tag{4-3}$$

令 $Q_a = \dfrac{a_B^b a_{H_2O}^c}{a_A^a a_{H^+}^m}$，则式（4-3）变为：

$$-\Delta G = RT\ln K_a - RT\ln Q_a \tag{4-4}$$

或

$$\Delta G = RT\ln Q_a - RT\ln K_a \tag{4-5}$$

上列各式中　K_a——化学反应平衡量常数；

R——气体常数，$R = 8.315\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$；

T——绝对温度；

a_A、a_B、a_{H_2O}、a_{H^+}——各物质的活度（mol/L）；

ΔG——反应的吉布斯自由能变；

Q_a——反应(活度)熵。

在恒温、恒压下,反应朝着体系吉布斯自由能变 ΔG 降低的方向自发进行。当 $Q_a < K_a$,ΔG 为负值,反应向右进行;当 $Q_a > K_a$,ΔG 为正值,反应不能向右进行;当 $Q_a = K_a$,ΔG 为零,反应处于平衡状态。

当反应物与生成的活度均等于1,温度为25℃,压力为0MPa时,式(4-5)变成 $\Delta G = -RT\ln K_a$,此时的 ΔG 称为标准吉布斯自由能变,一般记作 $\Delta G^{\#}$(自由焓)。

当涉及电极反应时,反应中吉布斯自由能变的降低值等于反应所做的最大有用电功,$\Delta G = nFE$。根据能斯特方程,则

$$-\Delta G = nFE = RT\ln K_a - RT\ln\frac{a_B^b}{a_A^a a_{H^+}^m},\left(a_{H_2O}^c = 1\right) \tag{4-6}$$

$$E = \left(\frac{RT}{nF}\right)\ln K_a - \left(\frac{RT}{nF}\right)\ln\frac{a_B^b}{a_A^a a_{H^+}^m} \tag{4-7}$$

式中　F——法拉第常数。

在标准状态下,式(4-7)变为:

$$E = E^\theta - \frac{0.591}{n}\lg\frac{a_B^b}{a_A^a a_{H^+}^m} = E^\theta + \frac{0.591}{n}\lg\frac{a_A^a a_{H^+}^m}{a_B^a} \tag{4-8}$$

铀矿浸出的氧化还原电位对浸出条件十分重要,常用的方程式为:

$$E = E^\theta + \frac{0.591}{n}\lg\frac{[O_x]}{[R_{ed}]} \tag{4-9}$$

式中　E——氧化还原电位;

O_x——氧化剂(活性的)浓度;

R_{ed}——还原剂浓度;

E^θ——系统的标准氧化还原电位(标准电极电位);

n——反应中的电子转移数。

生产实际中,必须经常测定氧化还原电位,用上述方程进行校核,使实测值大于计算值。

三、浸出动力学基础知识

(1)浸出机理和步骤

有用组分的浸出是在固液两相界面上按以下过程进行:①溶浸液外扩散过程。溶浸液从溶液主体相对于矿石块(颗粒)表面液膜而言,经过液膜外面对流扩散和通过液膜内的分子扩散抵达矿石块外表面。②溶浸液内扩散过程。溶浸液从矿石块的外表面通过矿石块内部毛细孔和裂隙以分子形态扩散到矿石块内表面。③化学反应过程。扩散到

矿石块内表面上的溶浸液与被浸金属矿物发生化学反应,产生反应生成物。④生成物内扩散过程。生成物从矿石块的内表面扩散到外表面。⑤生成物外扩散过程。生成物从矿石块外表面扩散到溶液主体。

若要加快浸出,必须抓住关键环节浸出速度。有用组分的浸出速度取决于扩散速度和化学反应速度。浸出过程包含对杂质的浸出,它对有用组分浸出带来物理和化学影响,可能需要后处理。

(2)扩散速度

扩散速度可用稳态扩散方程表示:

$$\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} = D \cdot A \frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}z} = D \cdot A \frac{C_1 - C_2}{z} \tag{4-10}$$

式中　s——扩散的物质量;

t——扩散时间;

C_1、C_2——扩散物在液膜两边的浓度;

z——液膜的有效厚度;

A——固液两相接触表面积;

D——扩散系数,表达式为:

$$D = \frac{RT}{N} \cdot \frac{1}{\pi \mu d} \tag{4-11}$$

式中　R——气体常数;

T——绝对温度;

N——阿佛加德罗常数;

μ——溶液粘度;

d——矿石块尺寸或颗粒直径。

从式(4-10)和式(4-11)可以看出,影响扩散速度的因素如下:矿石块度均匀且小,可以加速浸出;浓度之差越大,扩散速度越快;矿石疏松,扩散速度快。

(3)化学反应速度

酸碱法浸矿中反应速度与酸或碱的浓度、氧化剂及其加入的时间和量等有关。

四、微生物浸矿的基础知识

微生物浸矿是一个物理、化学和生物共同作用的过程。

(1)浸矿微生物

自然界中有一类微生物,可以直接或间接地参与金属硫化物或氧化物的氧化和溶解

过程,称为浸矿微生物。这种利用微生物的生物化学作用,选择性地将有用组分浸出来的方法,称为微生物采矿。浸矿微生物要通过适宜的培养基培植后,加入溶浸液中浸矿。微生物浸矿适用于金、铜、铀、银、锰、钴、镍、钒、镓、钼、锌、铝、钛等的浸出,广泛地用来处理低晶位铀、铜矿石,对难浸的金矿石及硫化物(如黄铁矿)矿石尤其有效。

(2)浸矿微生物的种类和特性

与矿物浸出有关的微生物大部分属于白养菌,在生长和繁殖中不需任何有机营养。在生产中用得最多的是氧化硫杆菌、氧化亚铁硫杆菌、氧化亚铁铁杆菌等,共同生存在强酸性矿坑水中。这三种微生物对革兰氏染色体呈阴性反应,能运动,0.5 ~ 2μm 大小,最适宜生长在 30℃左右,因菌种而异,个别达 37℃。目前已研究出适于高温浸矿的菌种。

(3)微生物浸矿原理

微生物浸矿是一个物理、化学和生物现象相互作用的复杂工艺过程,原理不很清楚,目前有多种说法。

①直接作用原理。指微生物与矿物表面接触,将金属硫化物氧化为酸溶性的二价金属离子和硫化物的原子团。

a)黄铁矿(或含金质铁矿)

$$2FeS2 + 7O_2 + 2H_2O \xrightarrow{\text{细菌}} 2FeSO_4 + 2H_2SO_4 \qquad (4-12)$$

b)黄铜矿

$$CuFeS_2 + 4O_2 \xrightarrow{\text{细菌}} CuSO_4 + FeSO_4 \qquad (4-13)$$

②间接作用原理。凡是利用 Fe^{3+} 为氧化剂的金属矿物的浸出都是间接浸出。氧化亚铁铁杆菌等具有把 $FeSO_4$ 氧化成 $Fe_2(SO_4)3$ 的能力。黄铁矿(FeS_2)矿石在无细菌参与下,能缓慢地生成 $FeSO_4$ 和 H_2SO_4。

$$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \longrightarrow 2FeSO_4 + 2H_2SO_4 \qquad (4-14)$$

在细菌作用下,能很快把硫酸亚铁氧化生成 $Fe_2(SO_4)_3$:

$$4FeSO_4 + 2H_2SO_4 + O_2 \xrightarrow{\text{细菌}} 2Fe_2(SO_4)_3 + 2H_2O \qquad (4-15)$$

生成的 $Fe_2(SO_4)_3$ 对金属硫化物起作用,将黄铜矿氧化成硫酸铜,将 U(Ⅳ)铀氧化为 U(Ⅵ):

$$Cu_2S + 2Fe_2(SO_4)_3 \longrightarrow 2CuSO_4 + 4FeSO_4 + S \qquad (4-16)$$

$$UO_2 + Fe_2(SO_4)_3 \longrightarrow UO_2SO_4 + 2FeSO_4 \qquad (4-17)$$

③破硫作用原理。在浸矿过程中,矿石块表面覆盖着许多含硫粘膜,阻碍了溶浸液与矿石块表面的直接作用,细菌可以将硫粘膜氧化和破坏,使浸出得以继续进行。

④复合作用原理。直接作用原理和间接作用原理同时存在,这是迄今得到多数人赞同的观点。

第三节　堆浸采矿法

一、概述

本法的特点是不加氧化剂且溶液一般处于非饱和流状况。与常规水冶工艺相比,堆浸法(图 4－1)具有以下优点:投资省,成本低,工艺简单,能耗低;能回收贫矿、低晶位废石、残矿和小矿点矿石。主要缺点是浸出周期长,回收率低。

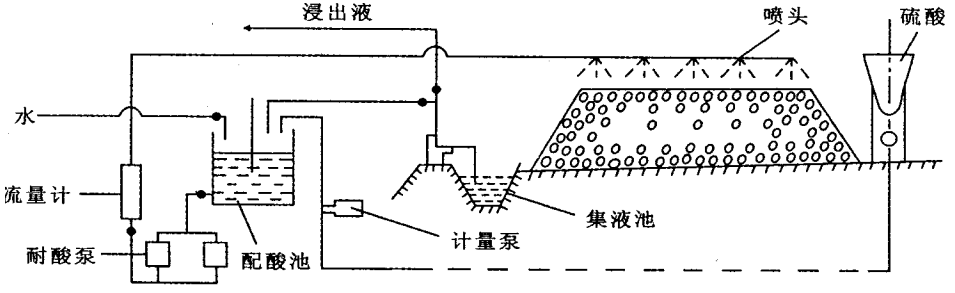


图 4－1　堆浸法示意图

国外采用堆浸法回收露天废石中的铜,产量十分可观,见表 4－1。

表 4－1　国外铜矿废石堆浸状况

技术指标 / 公司和矿山名	矿石产量(t/d)	废石名称	品位(%)	主要矿物	海绵铜产量(t/a)	浸出工作人员数
巴格达铜矿	36000	二长斑岩	0.25～0.76	辉铜矿 黄铜矿	7800	18
希诺矿	52000	石英闪长斑岩	0～0.5	氧化矿 黄铜矿	27000	23
迈阿密铜公司	28000	石英正长斑岩		辉铜矿 黄铜矿	13000	
犹他矿		石英岩		辉铜矿 黄铜矿	70000	31

根据溶浸液在堆内矿石中的流动形态,分为堆浸、槽浸和池浸。根据工艺不同分为普通堆浸法、拌酸熟化,高铁淋滤浸矿法。普通堆浸法又分为非筑堆浸矿法和筑堆浸矿法,本节只介绍这两种方法。此外还有细菌堆浸法、造粒堆浸法、脱泥堆浸法等。

二、非筑堆浸矿法

向未经专门筑堆的露天或井下废石堆直接布液进行浸出的方法。废石堆的堆底只作简单处理,如避开溶洞,除去杂草及丛灌木和滑坡体,对大裂隙进行堵填。堆的面积由几百至几百万平方米,高几米至数百米,堆量由数万至数十万吨,浸出周期由数日至数年。为了收集浸出液,在堆的下部布置集液池和输液设施。此种方法成本低,能减少环境污染。

三、筑堆浸矿法

(1)工艺流程

筑堆浸矿法的基本工序有:崩落矿石的搬运、筑堆、浸矿、浸出液的提取、卸堆等。筑堆前要进行矿石破碎(一般对矿石进行粗碎或中碎达到浸矿要求),堆场平整,集液设施安装,防渗漏处理。浸矿工作包括淋浸设备及设施的安装,溶浸液的输送与分配,淋浸,浸出液的收集与输送。卸堆工作包括中和浸后废石及运出废石。图 4-2 为我国铀矿石堆浸流程。

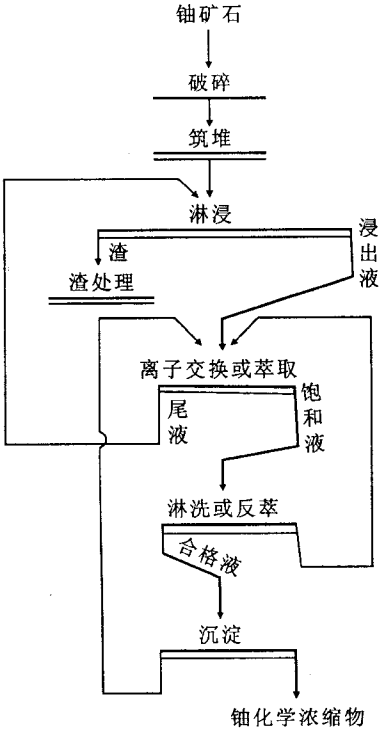


图 4-2　筑堆浸矿法的工艺流程

(2)堆浸前的研究工作

美国从20世纪70年代初开始从事黄金堆浸,到1983年,建成的22座黄金堆浸矿山竟有50%是失败的,原因是前期研究工作做得不充分。此后加强了前期研究,仅仅数年黄金堆浸就得到快速发展。研究内容为矿物特性、入堆矿石晶位、最佳粒度、浸出率、浸矿剂、堆场结构、筑堆方式、淋浸方式和速度、影响渗透性的因素、强化浸出方法、提取方式、卸堆方法及环境保护等。对某一具体矿山,必须进行详细的可行性研究、小样可浸试验、条件优化试验和现场扩大试验。

(3)堆浸场的基本设施

堆浸场系统见图4-3所示。从贮矿仓放出的矿石到破碎机破碎后(如矿石含泥量或粉矿过高则需造粒),由筑堆机械在铺设好的底垫上筑堆,然后对矿堆进行淋浸,最后用卸堆机将浸后废石送往废石场。溶液的流向为:溶浸液流向矿堆,对矿堆进行淋浸,浸出液流到富液池后用泵送人金属回收设施,尾液流往尾液池,大部分尾液经过pH值调节并加入适当浸矿剂后,重新返回对矿堆进行淋浸,如此循环,直到浸出终结。调节池的作用是供雨季防洪和旱季贮水。

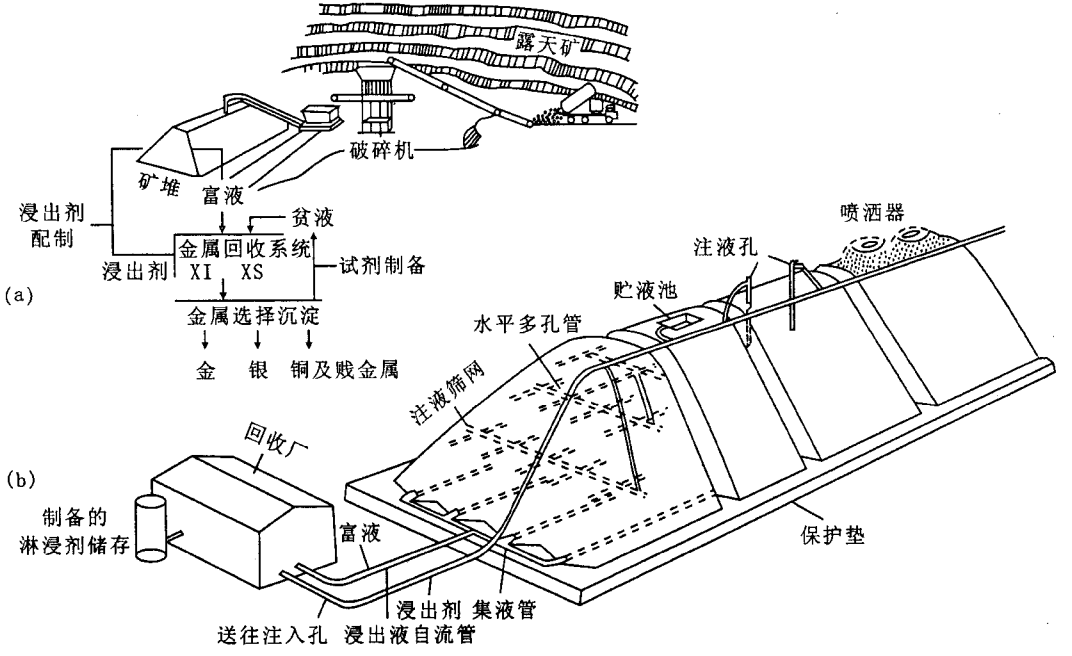


图4-3　堆浸场系统图

(a)开采系统;(b)回收系统

(4)堆场底垫

堆场底垫一般由地基、底垫层和保护层三部分组成。底垫层可用粘土和 PVC 软板构筑。底垫层之上有一层卵石铺成的保护层。底垫的主要功能是承载矿堆压力,收集浸出液,防止其流失和渗入地下,防止地下水涌人。底垫向出液口方向应有 3% ~ 5%的坡度,以便顺利排出浸出液。

(5)筑堆

①筑堆的要求。矿堆的几何形状、规模和结构尺寸取决于矿石性质、矿石块度、堆场面积、堆浸规模、地形等因素,一般为梯形。应满足以下要求:矿堆具有合理的、均匀的空隙度和渗透性,防止不同粒级矿石出现离析分级现象;具有较好的稳定性,矿堆不出现大的局部下沉或塌陷;具有合适的堆高,堆高主要取决于矿石的渗透性、所用的筑堆设备和筑堆方法等。高堆既节约堆场面积,又能获得较高的浸出率和较高的浸出液浓度,有利于堆内矿石的均匀浸出。但是,堆高过大,堆内空气流通量小,难以保证浸出过程的氧化条件,故一般堆高取 5 ~ 10m,国外达到 15m。

②筑堆设备。初期用矿车、电耙,甚至人工进行堆筑,逐步发展到采用推土机、自卸汽车等筑堆,后者存在效率低、劳动强度大、矿堆被压实从而影响渗透性和浸出效果等问题。第二阶段采用运输机筑堆,包括用永久性桥式运输机、延伸式运输机、多段皮带运输机系统筑堆,具有效率高、不压实矿堆的优点,但存在皮带运输机移动较困难,一次筑堆宽度小,不同粒级矿石块有离析现象和堆内孔隙分布不均的缺点。第三阶段用弧形筑堆机筑堆,一次筑堆宽度大,筑堆灵活、方便、效率高,矿堆透水性能好,矿石离析少,分布均匀,已成为美国和我国大型堆浸生产的主要设备。

③筑堆方法

a)多堆法。采用皮带运输或弧形筑堆机筑成多个具有一定高度的矿堆。

b)多层筑堆法。堆是多层筑成的,每层高 1.5m 左右,较粗矿石块堆在每层下部,较细的在上部,这样减少了垂直沟流的形成,使溶浸液能均匀地在矿堆内流动。

c)斜坡道筑堆法。先用废石筑一条与拟建矿堆同一高度的斜坡道,供运矿卡车行走,卡车把矿石卸至引车道两侧,再用推土机将矿石推向斜坡道两旁。

d)移动桥式吊车筑堆法。移动桥式吊车的基座沿堆外专用线移动,伸向矿堆上方的桥臂卸下矿石筑堆,具有矿石离析少、堆顶平整的优点,适用于筑平坦的大型堆。

(6)矿石浸出

矿石浸出包括布液、管道安装和淋浸等。

①布液。要求溶浸液均匀分布。主要布液方式有喷头喷淋,堰塘淋浸(在矿堆表面

上围设若干塘埂、每个塘埂内注满溶浸液并让其向矿堆渗流),滴管淋浸(在堆内设主管、支管和微管,在支管上隔一定距离开小孔,溶浸液从小孔或微管端部滴人矿石中),以及最近发展的雾化喷淋。

②管道安装。注意采用防酸碱材料和配件,安装良好。

③淋浸。淋浸强度一般用 10 ~ 15L/(m^2·h),可用连续和间隔两种淋浸制度。

四、堆浸法的生产管理

(1)淋浸管理

当风力大于四级、冰冻或一次降雨量为 100mm 的暴雨时,应停止喷头式喷淋,保持浸出液一定的 pH 值。

(2)浸出液化验

每班化验浸出液,注意酸浸时要求的 pH 值和氧化还原电位。

(3)环境保护

加强废水、废气和废渣的管理。

第四节　就地破碎浸矿法

就地破碎浸矿法有 70% ~ 80%的崩落矿石留在矿块内,不必进行大量运搬、运输和提升,所以生产成本有较大的降低,而且由于大部分崩落矿石浸出金属以后,作为废石原地留在矿块内,既免去了采后空场处理工序,节省费用,减少了安全隐患,同时少占用地面废石场地和堆浸地盘,减少对环境的污染。特点如下:大部分破碎矿石就地留下进行浸出,且多在矿块范围内移动;矿石就地进行破碎和筑堆,一般不必二次破碎;矿石浸出要在封闭环境下进行,才能取得理想的效果;应用条件与井下或地表堆浸法有一定差别。

一、工艺流程与关键技术

(1)工艺流程

崩落矿块内的矿石,并运出由于破碎而膨胀那部分体积的矿石;安装淋浸和集液设备并对矿石进行淋浸;浸出液的收集及贫液返回(图 4 - 4)。

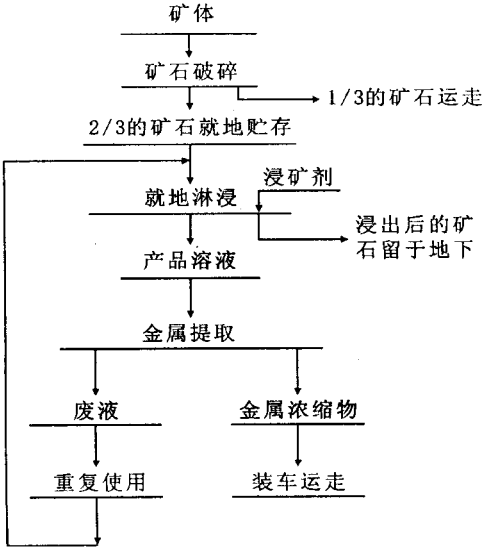


图 4－4　就地破碎浸矿法工艺流程图

(2)关键技术

矿石可爆破性的调查与评价,矿石及杂质浸出特性的研究。

二、矿块结构、崩矿及防渗漏工程

(1)矿块结构

矿块形状相当于留矿采矿法,堆高可达 30～60m,堆形与矿块轮廓基本吻合。

(2)崩矿方法

崩矿方法分为自然崩矿、强制崩矿和高压水射流破碎矿石。强制崩矿有浅眼崩矿、中深孔和深孔挤压崩矿。为了减小矿石块度,增加矿石内微裂隙和矿石堆孔隙率(粉矿含量不大于 20%～30%),爆破参数的选择十分重要。当用浅眼崩矿时,孔距比常规减少 1/3,炸药单耗提高 1～2 倍;用中深孔或深孔爆破时,单位炸药消耗量可以接近常规采矿法的第一次和第二次爆破单位药耗量的总和,一般通过工业试验确定。

(3)防渗漏工程

布置各种防渗漏工程,确保堆浸区与外界水力联系的隔断和封闭。

三、矿山开拓与浸准工程

就地破碎浸矿法矿山的开拓与常规开采方法基本相同,往往利用原有工程系统。若用单一的就地破碎浸矿法,要考虑以下因素:2/3 的矿石不外运,井巷规格和运输规模均

减小;地表工业场地相应缩小,但要留设占崩矿量 1/3 的堆浸场地;通风系统不仅要考虑正常需要,还要考虑排出酸、碱气体的需要;井下设备,特别是风机和水泵要有防腐措施;运输巷道的坡度要考虑排液要求,要设集液孔、集液巷道、集液池等集液工程。图 4 – 5 为就地破碎浸矿法的开拓、集液系统示意图。

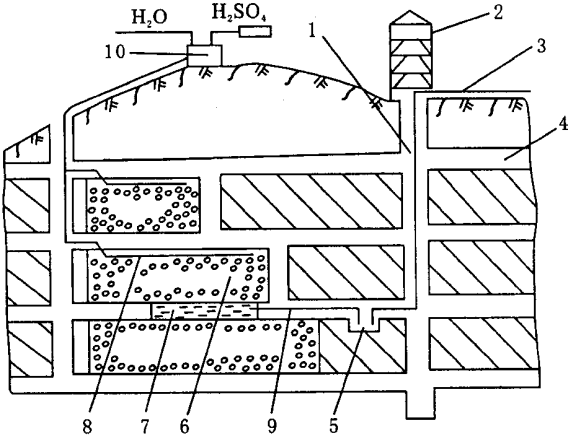


图 4 – 5　就地破碎浸矿法的开拓和集液系统示意图

1—竖井;2—井架;3—抽液管;4—阶段平巷;5—泵液池;
6—崩落矿石;7—井下集液池;8—输液管;9—富液输出管;10—配液池

四、就地破碎浸矿法的评价

主要优点:减少了开拓工程量,缩短了投产时间,每吨铜的基建费低,降低采矿成本达 30% ~ 50%,每吨金属铜的成本相当于露天采矿法;降低了边界品位,扩大了矿产资源储量;大大减少了对环境的污染程度。此法的应用范围在扩大,对坚硬致密矿体具有广阔的应用前景。

第五节　原地溶浸采矿法

从地表钻孔到矿层,通过钻孔把溶浸液注入矿层,与矿石中的有用组分接触发生化学反应,生成的可溶性化合物在扩散和对流作用下进入溶浸液中,从矿层另外的钻孔提升至地表的采矿方法叫原地溶浸采矿法,简称“地浸”,见图 4 – 6。

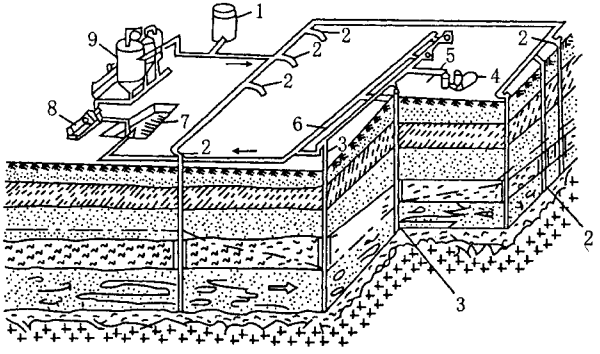


图 4－6　“地浸”立体示意图

1—溶浸液制备处；2—注液孔；3—抽液孔；4—空气压缩机；5—气升泵气管；6—富液（浸出液）汇集管；7—沉淀池；8—泵（富液输送泵）；9—浸出液处理装置

一、地浸的适应范围与工艺流程

通常认为矿石的渗透性是地浸在技术上是否可行的决定性条件。矿体顶底板的良好隔水性、矿石良好的可浸性是地浸成功应用的重要条件。地浸要求的主要地质和水文地质条件见表 4－2 所示。

目前地浸已大规模用于开采铀和铜矿床，正在推广用于金、锰、硒、钼、镍、稀土、铝、锌和磷灰石等矿石浸出，工艺流程见图 4－7。

表 4－2　地浸要求的主要地质和水文地质条件

序号	条件名称	适用于地浸的条件
1	矿床成因	砂岩型矿床（淋积，次生…）
2	含矿岩石及特征	疏松砂砾岩，砂岩与泥岩互层，砂岩与煤互层，含有机质岩石
3	矿石中的碳酸盐含量	小于 3%用酸法，大于 3%用碱法
4	矿石渗透系数或孔隙度	渗透系数 0.1～10m/d，孔隙度 30%左右
5	矿层顶板岩石及夹层的渗透系数	比矿石渗透系数小 1～3 个数量级
6	含矿层地下水位深度	一般在 50m 以内（地浸时矿体在地下水位以下）
7	矿体形态和产状	透镜状、卷状（最有利）、层状，产状平缓
8	矿体大小	厚几十厘米到几十米，一般 2～3m，宽几米到几百米，长几十米到 2000m
9	矿层地下水类型	孔隙水具承压性，水矿化度小于 5g/L
10	矿体含水性	矿体充水
11	矿体厚度与含矿含水层厚度之比	0.2～1.0

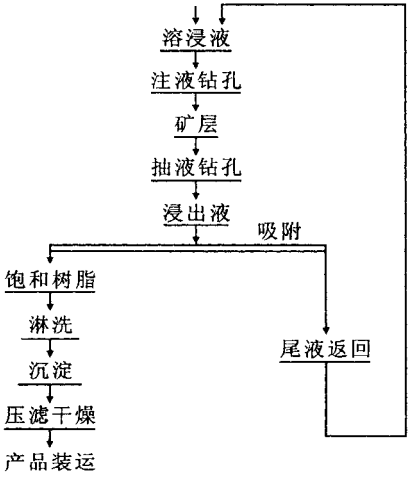


图 4－7　地浸工艺流程图

二、地浸三大技术

（1）钻孔工程

地浸的钻孔起到开拓、浸准、溶液输入与输出、圈定矿体与井场范围、控制溶液方向和速度等作用。钻孔的关键技术是平面布置方式、过滤器安装、扩孔技术、定量分配、隔离塞的构造和安排、封孔和洗孔技术。钻孔的布置方式见图 4－8 和图 4－9。

（2）溶浸液的配方和使用方法

最佳的配方和恰当的使用方法才能有好的地浸效果。好的使用方法是指不同的矿带和浸矿阶段应有不同的配方和不同用量。

（3）溶浸范围的控制

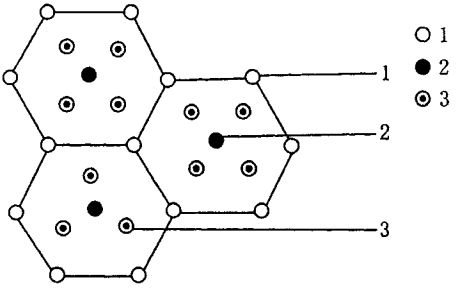


图 4－8　钻孔七点式布置平面图

1—注液孔；2—抽液孔；3—观测孔

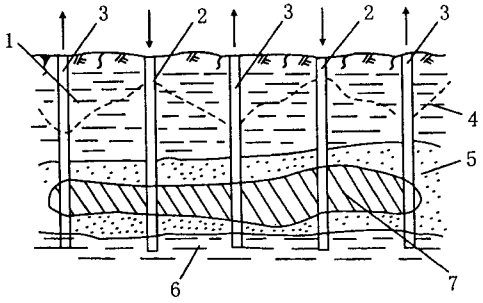


图 4－9　注液孔与抽液孔的配合形式剖面图

1—上部隔水层;2—注液钻孔;3—抽液钻孔;
4—液压线;5—含矿含水层;6—底部隔水层;7—矿体

在所需浸矿范围内,溶浸液不分散流失;使控制范围内所有矿石都能与溶浸液充分接触而不出现溶浸死带,以达到浸出率高、溶浸液和动力消耗低、对环境污染少的目的。

三、浸出液的提升

目前使用两种提升设备:空气提升泵和深并不锈钢潜水泵。前者构造简单,没有转动件,工作安全可靠,对井深有一定适应性,同时也可作水文方面的数据测定;主要缺点是能量利用率低,深井提升时提升量小,井场地表管道安装、防冻比较复杂,钻孑乙超深较大。深井不锈钢潜水泵的效率比空气提升泵高 4～6 倍,提升量大数倍,提升费用也有所降低,液流稳定,便于计量和自动控制,适用于 600m 以上的深井。主要问题是安装维修较麻烦,对材质和钻孔质量要求高,要求浸出液含砂量不大于 0.1%。

四、尾矿库就地浸出与负压提升

对尾矿库内的尾矿进行就地浸出后,使尾矿处于密封状态下,用负压提升法获得产品液。2001 年南华大学利用氨作为主要浸矿剂,对铜铀尾矿进行浸出获得成功。

五、地浸的评价

(1)优点

基建投资比常规采冶省一半,建设周期缩短 1/2～1/3,成本少 1/3～1/2,劳动生产率提高几倍到几十倍;环境保护好,无废石堆与尾矿库,基本上不破坏农田森林,放射性污染只是常规开采的 1/1000,从根本上改善了劳动和卫生条件,改变了矿山形象,使复杂的易出事故的采矿工作实现了化学化与工厂化全盘连续自动化生产;扩大了资源利用率,

对贫矿与埋深大、水文地质条件复杂及松软矿体可顺利地回采。

（2）缺点

适用条件苛刻，受地质与水文地质、矿石性质、地球化学等条件限制；如果矿化和矿石渗透性不匀，碳酸盐含量不同会造成浸出率低，回采困难；对地下水环境造成污染。

第六节　各环境保护

废液、废气、固体废料的污染仍没有全部免除，特别是地浸加大了对地下水的污染程度。目前对地下水污染处理的方法有结冰法、蒸发法、反渗透法、电渗法及还原法等，收到了明显的效果。

第五章　盐类矿床地下水溶开采

第一节　概　　述

盐类矿物的共性是能溶于水，不同的盐类矿物溶于水的难易程度不同。

盐类矿床是盐类物质在地质作用过程中，在适宜的地质条件和干旱的气候条件下，水盐体系天然蒸发、浓缩形成的天然卤水和化学沉积矿床。

水溶开采是根据盐类矿物易溶于水的特性，把水作为溶剂注入矿床，在矿床中进行物理化学作用，将盐类矿物就地溶解，转变为溶液——卤水，然后进行采集与输送的一类采矿方法。它在氯化物（石盐、钾石盐）、硫酸盐（无水芒硝、芒硝、钙芒硝）、碳酸盐（天然碱）等盐类矿床的开采中得到广泛运用，取得了良好的技术经济效果。

一、水溶开采的特点

水溶开采融采矿与选矿为一体，在盐类矿床所在地进行物理化学加工，使用最廉价的溶剂——水或淡卤（有的矿床加助溶剂如氢氧化钠等）溶解矿物，把泥砂等杂质留在原地。

水溶开采的优点是：工艺简单，钻井代替了常规的地下井巷，开拓工程量少，基建时间短，基建投资不到常规地下开采的四分之一，生产成本下降 80% ~ 90%；常规开采深度超过 1000m 后常遇到深部地压和地热增温等困难，钻孔则可以容易地超过 3000m，在一定条件下可提高盐类矿床的矿石采收率；管道化生产，采卤和输卤实现自动化，工人在地

面完成操作,安全生产条件好,劳动生产率高;盐类矿物溶解取走后,矿渣留在原地,不对地面环境造成污染。水溶开采存在的问题是基本理论和开采方法还不够完善,矿石采收率一般较低,少数矿山诱发地质灾害,出现地面沉降和冒卤。

二、盐类矿床的工业特征

除了矿床的一般工业特征外,盐类矿床的下列特性受到特别关注。

(1)盐类矿石与围岩的工业性质

①可溶性。盐类矿物的溶解度与温度、压力有关,溶解速度受矿石品位、化学成分、结构构造、温度、压力、溶液浓度、布水方式、溶液动态、溶液磁化等因素的影响。

②含水性与隔水性。孔隙较大的岩层含水性好,如砂层、砾石层、溶洞发育的石灰岩等,如果它们与盐类矿床沟通,就会破坏矿体,在钻井水溶开采时,应下套管固井,将含水层封隔。如果矿体中有断层通过,为防止断裂带的地下水破坏矿体,距断层 1km 以外才能布置溶采区。盐类矿层顶、底板岩层隔水性良好,有利于水溶开采。

③孔隙度。孔隙度是岩石孔隙体积与包括孔隙在内的总体积之比。盐湖类岩石的孔隙度是晶间卤水静储量计算的重要水文地质参数,与颗粒大小、形状、排列情况、级配、压密程度、胶结状况等因素有关,其范围从百分之几到百分之三十几,甚至更大,对水溶开采有重要影响。

④强度。盐类矿石的强度较低,抗压强度 5 ~ 37MPa,抗剪强度 0.7 ~ 14MPa,抗拉强度 0.3 ~ 2MPa;围岩的抗压强度 0.8 ~ 143MPa,抗剪强度 1.5 ~ 59MPa,抗剪强度 0.2 ~ 4MPa。

⑤硬度。硬度指岩石抵抗工具侵入的能力。岩石硬度分为 10 级,盐类矿物的硬度较低,为 1 ~ 4 级。

⑥韧性。指岩石抵抗冲击工具侵入的能力。一般沉积岩的韧度较低,为 0.08 ~ 0.4kg·m/cm。

⑦稳固性。水溶开采溶洞顶部暴露面积的大小及其在一定时间内保持稳定而不崩落的性能,叫盐类矿石与围岩的稳固性。它与矿石和围岩的结构与构造,裂隙发育情况,溶洞顶板岩石的工程力学和受水侵蚀后耐崩解的性能,以及溶洞大小等因素有关。不稳固的矿岩允许溶洞顶部有不大的暴露面积,当顶部暴露面积扩大后,顶板岩石极易垮塌,堵塞井下管柱和初始溶洞,无法继续开采。这类矿床一般不适宜用常规的钻井水溶法开采,如内蒙达拉特旗等第四纪芒硝矿。较稳固的矿岩允许溶洞顶部有一定的暴露面积而不垮塌,当溶采直径扩大并经较长时间侵蚀后,顶板逐渐垮塌,但水采溶洞仍保持一定的

容积,可继续进行水溶开采,矿石采收率一般较低,如广泛分布的陆相碎屑岩系型盐类矿床。极稳固的矿岩允许溶洞有很大的暴露面积而不垮塌,如海相碳酸盐系型盐类矿床,特别是厚大的盐丘中建造的水采溶洞极稳固,常用于储存石油、天然气等。

(2)盐类矿床的工业性质

①矿床规模与矿石质量。一般分为大、中、小三个类型。四种主要盐类矿床资源储量的划分标准见表 5-1。

表 5-1　四种盐类矿产资源储量规模划分标准(单位:104t)

	大型	中型	小型
石盐 NaCl	100000	10000~100000	<10000
钙芒硝 Na_2SO_4	≥10000	1000~10000	<1000
天然碱 $Na_2CO_3 + NaHCO_3$	≥1000	200~1000	<200
钾盐 KCl	≥1000	100~1000	<100

通常按矿石品位划分等级。石盐根据 NaCl 的晶位划分为:富矿 >80%,中矿 50%~80%,贫矿 30%~50%。钾盐根据 KCl 的晶位划分为:富矿 >12%,贫矿 8%~12%。

②矿体形态。盐类矿床的矿体形态简单,呈层状,似层状或透镜状产出,厚度稳定,沿走向和倾向延伸均较大。只有在强烈的构造作用下才形成盐丘矿床,形态变得复杂,厚度大。

③矿层厚度。影响水溶开采方法的选择,如薄层适宜用井组连通法开采,巨厚矿层适宜用油垫对流法开采。盐类矿层根据矿层厚度一般分为 5 类:极薄矿层 <0.5m,薄矿层 0.5~2m,中厚矿层 2~5m,厚矿层 5~20m,巨厚矿层 >20m。

④夹层厚度。我国盐类矿床的特点是矿层的层数多,单层厚度薄,常划分为若干个工业矿层,自下而上进行开采。一般来说,当非矿夹层厚度小于 2~3m 且矿层多、密度大时,常并入工业矿层;当非矿夹层厚度在 10~20m 以上,或非矿夹层厚度虽在 5m 左右,但矿层稀疏、厚度薄时,则划为工业矿层的顶、底板。

⑤矿体埋藏要素。我国盐类矿床大多数为微倾斜和缓倾斜矿床,云南和新疆部分矿床为倾斜矿床,有的属急倾斜矿床。硐室水溶开采时,矿体倾角影响矿床开拓和采场矿石运搬方法。钻井水溶开采时,影响钻井工程的布置。盐类矿体按埋藏深度可分为 5 类:裸露矿体直接出露地表;浅埋矿体的埋深 <500m;中深矿体的埋深为 500~1500m;深埋矿体的埋深为 1500~3000m;极深矿体的埋深 >3000m。目前主要开采盐湖矿床、浅埋和中深矿体,部分为深埋矿体,极深矿体一般未开采。

(3)盐类矿床开采技术条件

主要指盐类矿床水溶开采的难易程度,它影响水溶开采方法选择,钻井工程布置,水溶开采工艺参数的确定,服务年限等。

①矿床地质条件。主要包括矿床规模、矿体分布面积、矿层厚度、埋藏深度、夹层厚度、矿石品位、矿石结构与构造等。

②工程地质条件。指盐类矿层及其顶板岩石的物理力学性质,主要是矿岩的稳固性,影响溶洞直径大小和保安矿柱尺寸,以及矿石采收率的高低等。

③水文地质条件。主要指盐类矿层的上部和下部含水层的特性、分布状况及其对水溶开采的影响。

④环境地质条件。主要指水溶开采对其上部道路、村镇、河流、植被、农田和水利设施等的影响,它关系到采区布置和钻井工程布置,应防止在采集卤和输卤过程中卤水流失对生态环境的破坏,以及溶洞顶板垮塌可能引发的地面沉降与冒卤。

三、水溶开采的基本原理

(1)盐类矿物溶解机理

①溶解与结晶。当水与盐类矿物接触时,组成结晶格架的离子被水分子带相反电荷的一端吸引,当水分子对离子的引力足以克服结晶格架中离子的引力时,结晶格架遭到破坏,离子进入水中,这就是溶解盐类矿物的过程。水与盐类矿物接触时,同时发生两种相反的作用:溶解作用与结晶作用。溶解到水中的盐类离子,在运动过程中遇到尚未溶解的盐类矿物,可以被吸引,由溶液回到盐类矿物结晶格架上去。

②饱和溶液。盐类矿物开始溶解时,溶液中盐类物质的离子少,溶解速度大于结晶速度。随着溶解过程的进行,溶液浓度逐渐增大,溶解作用变慢,结晶作用加快,当单位时间内溶解与析出的盐类物质数量相当时,溶液达到饱和。

③溶解过程中的热动力现象。物质溶解同时发生两个过程:一是破坏晶格,溶质粒子与晶体分离并向溶液中扩散,要吸收热量,这是物理过程;二是溶质分子和水分子结合生成水化物要放出热量,这是化学过程。这个物理－化学过程与各种物理化学条件有密切关系。

④复盐矿物的水溶。多种盐类矿物共生的复盐矿物在水溶过程中有以下情况:

a)组成复盐矿物的单盐组分溶解度相差不大时,在水溶过程中不形成中间产物,如钾芒硝矿物 $K_3Na(SO_4)_2$ 在 10～20℃水溶时,其单盐 Na_2SO_4 和 K_2SO_4 的溶解度相差较小,属于这种情况。

b)各单盐的溶解度相差较大且均易溶时,溶解度较小的单盐在水溶过程中形成暂时

稳定的中间产物，但随溶解时间的增长，这个中间产物也会被溶解，如光卤石矿物 $KMgCl_3 \cdot 6H_2O$ 由单盐 KCl 和 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 组成，均易溶，在 10～20℃时，溶解度较小的 KCl 可形成暂时稳定的中间产物，但溶解时间增长后，中间产物亦被溶解。

c）各单盐的溶解度相差较大，且其中一种单盐难溶于水时，这种单盐在水溶过程中形成的中间产物不再溶解，如钙芒硝 $Na_2Ca(SO_4)_2$ 的单盐 Na_2SO_4 易溶，$CaSO_4$ 难溶，所以在水溶开采钙芒硝矿床时形成大量的中间产物石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$），不再溶解。

（2）溶解度

①溶解度及其影响因素。固体盐类物质的溶解度是在一定温度（15℃）和压力（0.1MPa）下，单位体积溶剂（水）中所溶解的某种盐类矿物的饱和盐量，单位为 g/100g。盐类矿物溶解度由大到小的顺序是：氯化物，硫酸盐，碳酸盐，硼酸盐。温度和压力对溶解度有不同程度的影响。一般来说，盐类矿物的溶解度随温度的升高而增大。在 0MPa 压力时，石盐在水中的溶解度为 359.1g/L，在 25MPa 压力时为 362.2g/L。

②盐类矿物共生的溶解度变化规律。对于矿石中含有两种以上的盐类矿物共生时，其溶解度遵循以下规律：溶液中出现与该盐类物质含有共同离子的另一种盐类矿物时，该盐类物质的溶解度降低，如 KCl 与 NaCl 的共同可溶性，在任何温度下都比它们单独溶解时的溶解度小。在溶液中出现与该盐类物质未含共同离子的另一种盐类物质时，该盐类物质的溶解度增大，如 $CaSO_4$ 的溶解度由单独溶解时的 2.08g/L 增加到在 NaCl 溶液中的 5～6g/L。

（3）溶解速度

盐类矿物在单位面积和单位时间内所溶解的盐量称为溶解速度，单位是 g/（$cm^2 \cdot h$）或 kg/（$m^2 \cdot h$）。

①影响盐类矿物溶解速度的内在因素

a）盐类矿物的水溶性。不同盐类矿物的水溶性不同，石盐、钾石盐、芒硝等矿物溶解速度快，钙芒硝等缓慢溶于水，石膏、硬石膏等难溶于水。

b）盐类矿石的组分。多种盐类矿物共生的矿床，其主要盐类矿物的溶解速度受其他组分的影响，如水溶开采钙芒硝－石盐矿床，若将含 Na_2SO_4 的制盐尾液回输到矿床进行采卤，既可减少环境污染，又可降低 Na_2SO_4 的溶解速度，实现石盐的选择性开采。

c）盐类矿石的晶位。通常情况下，矿石品位高，盐类矿物的溶解面大，溶解速度快。

d）盐类矿石的结构与构造。矿石结构紧密，水与盐类矿物的接触面小，溶解速度慢；矿石结构疏松，裂隙发育，水可以深入到矿石内部，接触面积大，溶解速度快；现代盐湖沉积的盐类矿产，未经硬结成岩作用，孔隙度一般为 20%～30%，溶解速度快。

②影响盐类矿物溶解速度的外部因素

a)溶液的运动状态。在相同条件下,注入井内的水不断循环,可以加速扩散作用,增大溶解速度;超声波用于水溶采矿,把电能转化为机械能,产生波的振动,起到破坏盐层结构的作用,能提高溶液渗透率。

b)溶液的浓度。浓度低时,溶解速度快。

c)溶液的温度和压力。一般来说,盐类矿物的溶解速度随温度的升高和压力的增加而提高,石盐在不同温度下的溶解速度变化很小,用提高水温来加速溶解在经济上不合算,而芒硝受温度影响大,用热水作溶剂可以取得良好的经济效益。

d)溶解面的空间位置。溶液在溶洞下部的浓度高,上部的浓度低,主要利用侧溶和上溶,只有在盐湖固相矿床水溶开采时,才利用侧溶和底溶。

e)溶剂的性质。水经磁化后,溶解度增加约 50%,但水经磁化后氧离子浓度增大,导致井管和采集卤水管道的腐蚀加剧,因此采用磁化水加速溶解仅适于建槽期的强化开采,不宜长期采用。

{)添加辅助溶剂。可提高某些盐类矿物的溶解速度,如加入 3% ~ 5%的 NaOH,可提高天然碱的溶解速度和溶液浓度。

(4)侧溶底角

盐类矿石中的不溶残渣不断沉积于溶洞底部。覆盖底部未溶盐类矿石,逐步在溶洞底部形成一个以钻井或初始硐室为中心、形似空心倒圆锥体的倾斜底面,倾斜底面与水平面的夹角 α 称为侧溶底角(图 5 - 1)。矿石的水不溶物含量低、晶位高时,侧溶底角小,溶洞未溶矿石损失少,矿石采收率高。云南三个盐矿在坑道与溶洞中实测的侧溶底角为 24° ~ 42°。

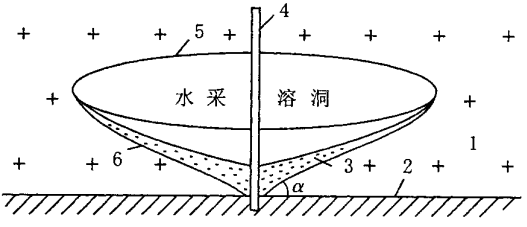


图 5 - 1　水溶开采溶洞的侧溶底角示意图

1—石盐矿层;2—盐层底板;3—水不溶残渣;
4—钻井;5—溶洞顶板;6—溶洞底板;α—侧溶底角

(5)钻井水溶开采的溶解作用与溶洞形状

由于开采方法不同,溶解作用的进行情况不同,形成的溶洞形状主要有圆锥形(或圆柱形)和长槽形(或楔形)。

①单井对流法水溶开采的溶解作用和溶洞形状

这种开采的溶解作用有静溶和动溶之分,溶洞形状可为圆锥形或圆柱形。简易对流法的正循环形成的溶洞分三个阶段(图 5-2)。第一阶段水从中心管注入后,沿管状井壁向上冲刷、溶蚀,形成梨形溶洞,溶解速度大于每日 10~15cm。第二阶段注入水与卤水混合,向上回流、溶蚀,溶洞发展成圆柱状。第三阶段溶洞进一步溶蚀扩大,卤水浓度在垂直方向上出现差异,上部浓度低溶解速度快,下部浓度高溶解速度慢,在溶洞周壁出现斜坡,水不溶物覆盖在未溶盐层上,底部溶解作用趋于停止,形成指数曲线形的空心倒圆锥体。

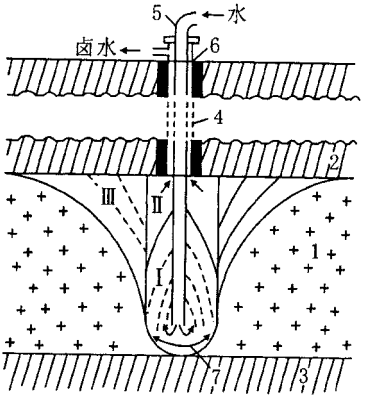


图 5-2　简易对流法正循环溶洞发展示意图

1—盐层;2—矿层顶板;3—矿层底板;4—套管;5—中心骨;6—套管水泥环;7—不溶物;
Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ—溶洞发展阶段

②井组连通法开采的溶解作用和溶洞形状

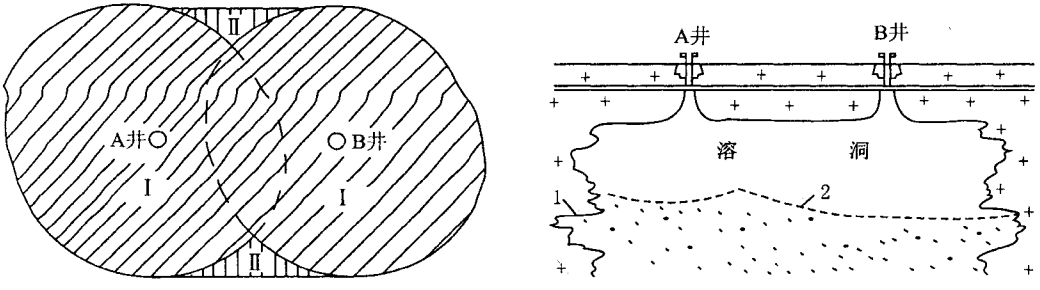
a)两井溶蚀连通开采的溶解作用和溶洞形状

第一阶段两井各自注水溶解,在水平面上均以钻井为中心呈似同心圆柱向外扩展(图 5-3),简易对流开采形成的溶洞形状呈似圆锥体,油垫对流法和气垫对流法开采的溶洞形状呈似圆柱体。第二阶段为两井分别形成的圆锥形(或圆柱形)溶洞连通后,注水井和出卤井交替进行,溶解作用自连通通道向两侧扩展,溶洞形状发展成两端呈半圆锥,中部呈楔形的楔状溶洞,或两端呈半圆柱,中部呈长方形的长槽状溶洞。

b)强制性快速连通水溶开采的溶解作用和溶洞形状

压裂连通、定向井连通和组合连通均属强制性快速连通,连通的原始通道很小。第

一阶段 A 井注水 B 井出卤,溶解作用自 A 井外侧呈似同心圆状向外扩展,由 A 井至 B 井随着溶液浓度逐步升高,溶解速度逐渐变慢,溶洞直径逐渐变小,呈 A 井大 B 井小的喇叭状(图 5-4)。第二阶段改为 B 井注水 A 井出卤,表现出与第一阶段相反的进程。第三阶段适时调整注水井与出卤井,使溶洞逐渐发展成为两端呈半圆柱、中间呈长方形的长槽状溶洞。



(a)　　(b)

Ⅰ、Ⅱ—溶洞发展阶段　　1—泥砾石盐;2—不溶物堆积推断线

图 5-3　气垫建槽连通—梯段法上溶开采溶洞形状发展示意图

(a)溶洞形状平面示意;(b)溶洞形状削面示意

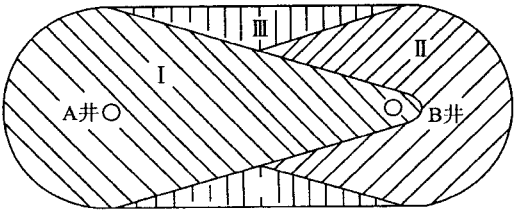


图 5-4　强制性快速连通井组水溶开采溶洞形状发展平面示意图

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ—溶洞发展阶段

水采溶洞的实际形状,需在水采过程中借助超声波测井仪定期测量确定。

四、开采单位、开采步骤与开采顺序

水溶开采矿山的钻井用于盐类矿床开采,称为盐井。将水注入地下溶解盐类矿石,形成卤水后采出,称为采卤。

(1)开采单位

水溶开采的开采单位通常划分为矿区、采区和开采单元。

①矿区。划归独立的矿山企业或有关厂、矿、公司开采的盐类矿床叫矿区。

②采区。用一套独立的生产设施进行开采的单位叫采区。根据矿石的溶解特性,采区长边应沿矿体长轴方向布置,采区面积一般在 0.5 ~ 1km^2。对于多种盐类矿物的盐湖固相矿床的水溶开采,需将每一种盐类矿石的采区进行隔离,如划分为石盐采区、芒硝采区、光卤石采区等。

③开采单元。最小的开采单位,如钻井法水溶开采,每隔一定间距布置一个井组形成开采单元。一个井组一般由 2 ~ 3 口井组成,井距通常为 60 ~ 120m,组距为井距的 1.5 ~ 2 倍。

(2)开采步骤

硐室水溶开采法的开拓、采准工作与普通地下开采相同,只是用水溶方法回采。

钻井水溶法可划分为两个阶段:开拓阶段和回采阶段。开拓阶段的主要工程是钻井工程,其次是供水、采卤、集卤、输卤工程和相应的地面配套设施。单井对流法的采准是建槽,井组连通法的采准是水力压裂,它们常与回采工作结合进行,合并为回采阶段。

开拓阶段和回采阶段提供开采的矿石工业储量分别为开拓矿量和备采矿量。

水溶开采的矿山建设时间较短,数月至一年多就可建成投产,备采矿量两年以上就可实现持续均衡生产。投产后的主要开拓工程仍是钻井,即更新井。随之延伸的采卤、集卤管道和计量、检测仪表的工程量较少。

在盐井生产过程中,生产能力逐渐衰减,经常发生故障,需定期或不定期检修。为了保证矿山均衡生产,需增加备用井。备用井控制的备采矿量约为正常生产井控制的备采矿量的 30%,矿山规模小时,可适当增加备采矿量。

(3)开采顺序

①工业矿层的垂直开采顺序。只有一个工业矿层时,应先溶解开采矿层的下部,再往上部逐步溶解开采。当矿床有多个工业矿层时,应先溶解开采最下部的工业矿层,再自下而上逐个对工业矿层进行溶解开采。因为矿渣沉积在溶洞底部,会阻碍底部矿层的溶解。

②采区内平面开采顺序。为加快矿山建设,一般选择盐类矿层埋藏较浅的矿段先期开采。当采区中靠近矿部一端的矿层埋藏较浅时,钻井工程和地面配套设施布置在靠近矿部一端,向采区另一端推进开采,称为前进式开采,这种顺序的基建采卤和集卤主管道工程量小。反之,首期开拓工程布置在远离矿部的浅部矿段,向采区靠近矿部的一端推进开采,称为后退式开采,它需一次完成采区采卤和集卤主通道的敷设,基建投资和管道维修工作量较大。

五、矿山建设规模与服务年限

(1)矿山建设规模

水溶开采矿山的基建规模以生产卤水的主要盐类组分的年产量表示。矿山生产的卤水是初级产品,其生产规模与主要终端产品生产厂的规模相匹配,并留有矿山备采系数,其计算公式如下:

$$A = A_1 \omega / \varepsilon \tag{5-1}$$

式中　A——矿山的卤折盐年产量,t/a;

A_1——终端产品年需用盐量,t/a;

ε——生产厂的卤折盐回收率,%;

ω——矿山备采系数,一般取 1.3。

盐类矿床水溶开采矿山的建设规模见表 5-2。

表 5-2　盐类矿床水溶开采矿山建设规模与采区服务年限

矿床类型	主要终端产品	矿山建设规模(10^4t/a)			备　注
		大型	中型	小型	
盐湖石盐矿床	NaCl	≥70	70~20	<20	轻工业部设计规范
石盐矿床	NaCl	≥30	30~10	<10	轻工业部设计规范
钾盐矿床	KCl	≥5	5~3	<3	轻工业部设计规范
钾盐矿床	K_2SO_4	≥3	3~1	<1	国外最小经济规模 3×10^4t/a,国内 1×10^4t/a
无水芒硝、芒硝矿床	Na_2SO_4	≥5	5~1	<1	最小经济规模 1×10^4t/a
天然碱矿床	Na_2CO_3	≥20	20~10	<10	最小经济规模 10×10^4t/a
采区服务年限	(a)	>20~15	>15~10	>10~5	

市场对矿产的需求量是决定建设规模的重要考虑因素。矿山建设要达到一定的经济规模才能取得较好的经济效益,石盐矿床的最小经济规模为年产 10^5t,芒硝和无水芒硝为年产 10^4t。矿石储量一般与矿山建设规模成正比。矿石溶解速度快,建设规模可大一些,如石盐、钾石盐、无水芒硝、芒硝矿床;溶解速度慢,一般宜建中小型矿山,如钙芒硝矿床。

(2)矿山服务年限

矿山服务年限 T 可参见表 5-2,它与矿石储量、矿山生产能力的关系如下:

$$T = QCK/A \tag{5-2}$$

式中　Q——矿石储量，t；

C——矿石品位，%；

K——矿石采收率，%；

A——主要盐类矿物的矿山年产量，t/a。

六、矿石采收率与开采损失率

（1）矿石采收率

钻井水溶开采通常按采区计算矿石采收率（K），公式为：

$$K = k_1 k_2 k_3 \tag{5-3}$$

式中　k_1——面积开采系数，为采区内钻孔控制的开采面积与采区面积的比值；

k_2——厚度开采系数，为设计采区开采的主要工业矿层工业储量与开采面积内全部矿层的矿石储量之比；

k_3——实际开采的工业矿层矿石采收率，为该矿层实际采出的矿石储量与该矿层矿石储量的比值。

目前国外水溶开采矿山的矿石采收率：用简易对流法开采 200～300m 厚度的盐层为 2.5%～3%，开采 30～40m 厚度的盐层为 5%～10%；用油垫对流法开采为 10%～20%；油垫对流法建槽、分梯段上溶开采为 20%～30%；用井组连通法开采为 30%～35%；用硐室水溶法开采为 25%～30%。

我国矿山采收率较低，只有部分矿山大于 20%，个别矿山在矿层顶板稳定的情况下，达到 80%以上。

（2）开采损失率

开采过程中盐类矿石损失的数量与盐类矿石工业储量之比称为开采损失率。造成盐类矿产损失的主要原因有：为采区内铁路、河流、重要建筑物等预留的保安矿柱的压矿；顶板稳固性差，垮塌压矿；水采溶洞的卤水浓度呈现垂直分带，形成侧溶底角，下面矿层被泥砂等水不溶物覆盖难以溶解；卤水渗入围岩地层和裂隙而流失；开采方案不合理；矿山地质工作和技术管理工作薄弱等。

七、水溶开采矿山采空区的稳定性

（1）水溶开采矿山岩移和地面沉陷

随着水溶开采溶洞直径的扩大，其顶板不断垮塌，损坏井下管柱，需修复后才能继续生产，单井对流法开采的矿山尤为突出，而岩移波及地表引起的地面沉陷，可能引发地质

灾害。

(2)影响采空区稳定的因素

①开采深度。发生地面沉陷和变形的盐矿采深一般小于500m,采深500~3000m的盐类矿床尚未出现地面沉陷。

②开采厚度。开采矿层的累计厚度越大,越容易引起地面沉陷和变形,地面下沉极限值约等于矿层开采厚度的0.9倍。

③溶洞直径。目前一般控制在几十米至100m,也有的达150~200m甚至更大。溶洞直径越大,越容易引起地面变形和沉陷。

(3)溶洞直径尺寸的确定

用空场极限跨度计算溶洞最大直径 Φ 的公式为:

$$\Phi = 1.73\sqrt{\frac{\omega H}{\gamma}} \quad (\mathrm{m}) \tag{5-4}$$

式中　σ——顶板岩石抗压强度,kPa;

H——溶洞顶板埋深,m;

γ——顶板岩石体分布力,$10\mathrm{kN/m^3}$。

(4)保安矿柱尺寸的确定

目前尚无合适的计算公式,一般根据经验确定。云南省几个盐矿的经验是矿房尺寸与矿柱尺寸相近时,采空区顶板较稳定。

(5)地面沉陷和冒卤的防范措施

原地质勘探孔和开采报废井,用水泥将矿层顶板及上覆地层封堵;严把钻井工程质量关,防止井管过早断裂,确保封闭条件;先采深部矿层,上行开采,充分回收资源并推迟地面沉陷;确定合理的水溶开采溶洞尺寸和保安矿柱尺寸;浅埋矿床应适当控制采厚;严格采卤操作规程,防止突然停泵产生水锤的冲击作用,采区附近不宜安装振动设备,防止其诱发与加速开采溶洞顶板的垮塌;完善水采溶洞的研究与测试手段,建立采区地面移动观测网。

(6)溶洞的利用

盐层厚度大的水溶开采溶洞可能具有良好的稳定性,在国外已建起了不少的地下储库。第一次世界大战期间,德国利用溶洞储存天然气和石油;1958年加拿大把溶洞建成地下储库用以储存乙烷和乙烯等。此后,欧美经济发达国家纷纷在盐矿中建造水溶开采溶洞,大量储存石油、天然气,储存核废料和化学工业的有害、有毒残渣,这也将成为我国地下储存的发展方向。

八、水溶地下开采的开拓方法

在矿床中建造初始溶解面，建立完整的注水、采卤、贮卤和运输系统，以便对盐类矿石进行开采，称为盐类矿床水溶开采的开拓。

（1）地下开拓方法

现有的水溶开采地下开拓方法主要有井巷开拓法和钻井开拓法。

①井巷开拓法。与地下开采的井巷开拓方法相同，自地表掘进井巷开拓工程至矿层后，在运输平巷之下开掘若干原始溶解硐室，安装注水管道和采卤管道至各溶解硐室，作注入淡水和抽汲卤水之用。特点是：需要设备多，开采深度较浅；开拓工程量大，费用高，基建时间长；劳动生产率较低，卤水开采成本较高，开拓井巷运到地表的岩矿对环境污染较大。适用于水不溶残渣膨胀系数较大的盐类矿床开采（如低晶位石盐矿床、钙芒硝矿床），如云南平浪盐矿、四川新津钙芒硝矿。

②钻井开拓法。自地表钻井至矿层后，下套管至矿层顶部，并用油井水泥固井，封固矿层以上地层，钻井下部的裸眼井是原始溶解硐室，井筒则是注入淡水和返回卤水的通道。特点是：基建工程量较小，投资省，基建时间短；劳动强度低，生产卤水成本较低；开采深度大；矿石采收率一般较低；矿渣留在地下，对环境污染较小。适用于埋藏较深的易溶盐类矿床开采，如湖南湘潭盐矿、湖北应城盐矿、四川长山盐矿、江苏洪泽无水芒硝矿、河南吴城盐碱矿。

（2）开拓方法的选择

影响开拓方法选择的主要因素有：矿床开采技术条件，即矿床地质、水文地质和工程地质条件；经济地理条件，即交通、能源与气候条件；经济因素，即矿山建设投资等。选择水溶开采开拓方法应遵循下列原则：工艺简单，技术先进；工程量小，投资省；基建时间短，投产快；少占土地，环境效益好；管理集中方便，经营费用低。

九、地下水溶开采方法

（1）地下水溶开采方法的分类

根据开拓方法的不同，地下水溶开采方法可分为硐室水溶法、钻井水溶法两大类。其中硐室水溶法仅适用于矿石品位低、水不溶残渣膨胀系数较大的盐类矿床，如低品位石盐矿床和钙芒硝矿床等。钻井水溶法又可分为表 5－3 所列的亚类和小类。

（2）地下水溶开采方法选择

①影响地下水溶开采方法选择的主要因素：

表 5－3　钻井水溶法分类

亚类	小类	开采方法	备注
提捞和抽汲采卤法		提捞采卤法	
		抽汲采卤法	
单井对流法		简易对流法	
		油垫对流法	
		油气垫对流法	
井组连通法	对流井溶蚀连通法	自然溶蚀连通法	
		油垫建槽连通法	
		气垫建槽连通法	
	压裂连通法	压裂连通法	个别矿山用“吞吐法”
	定向井连通法	定向斜井连通法	
		中小半径水平井连通法	
		径向水平井连通法	尚在研究试验

a)矿层厚度。巨厚矿层适合用油垫对流法开采。

b)矿石品位。石盐富矿、中矿可用单井对流法和井组连通法开采;贫矿埋藏较浅时可用气垫对流法或气垫建槽连通法开采;水溶残渣不多、膨胀系数大时,可用硐室水溶法开采。

c)矿体埋深。矿体埋深小于 150m、矿石品位 > 40% 的贫矿宜用气垫对流法、气垫建槽连通法;埋深小于 500m、水不溶残渣多、膨胀系数大的贫矿宜用硐室水溶法;钻井水溶法可用于埋深数十米到 3000m 的矿体。

d)矿石和围岩的稳固性。稳固性差不宜用水溶法开采。

e)成矿后构造。矿区构造裂隙发育时不宜用压裂连通法。

②水溶开采方法选择的原则:方法先进,工艺成熟可靠,设备高效、节能、耐用,具有合理的开采强度,生产的卤水浓度高,产量有助于提高矿石采收率,充分、合理地开发利用盐类矿产资源,确保安全生产和环境效益,主要技术经济指标先进。

第二节　钻井水溶法的矿床开拓

钻井水溶法开采盐类矿床的开拓工程包括钻井工程和采集卤工程,以下仅介绍钻井工程。

钻井工程一般分为三个阶段:钻前准备阶段,钻井阶段、完井阶段。

一、钻前准备阶段

(1)钻井设计

①钻井地质设计。一般应包括下列内容:井位,井别,设计井深,地层分析,特殊地层及故障提示,录井资料要求,钻井质量要求等。

②钻井工程设计。一般应包括下列内容:井位及地质概况,钻井主要设备,井身结构,井身质量,钻具组合,洗井液,钻井参数设计,固井设计,各次开钻或分井段(含取心)施工重点要求,完井井口装置,环保要求,施工进度计划,钻井成本核算等。

(2)井场布置

测量井位坐标和高程;征地、修路,安装供水管道,架设供电与通讯线路,平整井场;钻井设备的搬迁、安装和试车;建设值班房、岩心库和砂样台;建设坡度 < 2% 的泥浆槽等。

二、钻井阶段

(1)钻机类型及选择

①冲击式钻机。钻机简单,易操作,维修方便,但钻进速度慢,可钻千米的井。

②旋转式钻机。钻机复杂,机械化程度高,钻进速度快,应用广泛。

(2)钻井

根据岩石硬度和井身结构,选用合适型号与规格的钻头,进行不同直径井段的全面钻进和取心钻进,正确选择洗井液,保护井壁,预防和处理井下事故。钻达设计的目的层位和深度。

(3)钻井地质工作

收集各项地质资料和数据,主要内容有以下几项:各项录井资料,包括岩心录井、岩屑录井、泥浆录井和地球物理测井等;钻遇地层的漏失、涌水、卡钻、放空及石油、天然气、地下水和地下卤水等显示资料;盐类矿层及顶底板的取样、化验及物理力学性能测定等资料;各井段井径及深度等资料;表层套管、技术套管和固井有关数据;最后将各项资料综合整理,编制钻井综合柱状图、含盐岩系柱状图、完井地质总报告。

三、完井阶段

(1)地球物理测井

把测井仪器放入井内移动,可测量出地层的物性参数。

①测井方法。常用的测井方法有:电法测井、放射性测井、工程测井。

电测井法分为电阻率测井和自然电位测井。前者利用岩石导电性不同的特性,测定电阻率比其他沉积岩大的盐类矿层;后者测定地层和泥浆间电化学作用和动电学作用(泥浆柱与地层间存在压力差时,液体发生过滤作用)出现的自然电位。配合其他资料划分岩性,进行地层对比。

放射性测井分为自然伽马射线测井和中子测井。前者是以测定地层中放射性物质产生的自然伽马射线的强度为依据判断岩性;后者是向地层发射快中子,使之与地层介质发生多种核反应,来测量地层的含氢量和充满液体(水或石油)的孔隙度。

工程测井分为以下几种:井径测井,用井径仪测定不同井深的井径变化;井斜测井,用井斜仪逐点测量钻孑乙井斜;井温测量,用井温仪了解井下温度的变化;磁性定位测井,用磁性定位仪了解每个套管接箍的实际井深,也可用来检查套管断裂的位置;声幅测井,根据地层密度小的岩石声速低,声波能量衰减大,幅度呈现低值的特点,划分岩性破碎带和检查固井质量;超声波测井,用超声波测径仪测量超声波穿过卤水碰到溶洞壁折返回来所需的时间,测定溶洞的几何形状(图 5 – 5)。

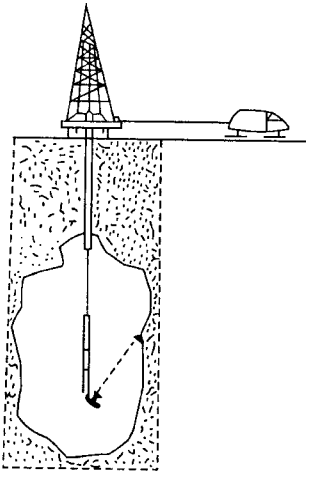


图 5 – 5　超声波井径测井

②测井可以解决的地质与工程问题。划分钻井地层,确定地层岩性、厚度和埋藏深度;确定盐类矿层的层位、厚度和顶底板地层的岩性与厚度;寻找井内漏失层、出水层和管外窜流位置;测量和检查钻井工程质量情况;测量水采溶洞的形状和大小。

(2)固井

①下套管。盐井在建井过程中需要下一层或多层套管。先进行套管程序设计:确定井身结构,包括套管层次、各层套管的管径、下人深度等,主要原则是避免出现井漏、井塌、卡钻等情况,便于修井、处理井下事故,满足开采工艺与生产能力要求。再进行套管柱设计:确定套管的安全系数,采用等安全系数法,使各段套管的最小安全系数等于或大于规定的安全系数。目前盐井一般下两层套管,表层套管用于封隔近地表的松软地层、砂砾层和地下含水层,技术套管用于封隔盐类矿层上部的岩层。最后下套管:技术套管需在地面进行清水试压,下套管前必须下钻通井,清出阻卡井段和井底沉砂,下套管柱至设计深度,开泵循环泥浆,当进出口泥浆性能基本相同后,即可注水泥浆。

②注水泥浆。注浆设备为水泥车,油井水泥是主要固井材料。注水泥浆的目的在于封隔含水层、严重漏失层和其他复杂地层,支撑和保护套管,保护岩类矿层。由于要把水泥浆用泵往井下输送几百米甚至几千米,井下的温度和压力随井深的增加而增加,因此,对油井水泥的要求不同于普通硅酸盐水泥。我国油井水泥浆的物理性能见表 5 – 4 所示,水灰比一般在 0.5 左右。

表 5 – 4　油井水泥浆物理性能

水泥颗粒细度 0.08mm 筛余物(%)	水泥浆密度(g/cm³)		水泥浆流动度扩散直径(cm)		水泥浆凝结时间(h)				水泥石抗折强度(MPa)		
					冷井水泥(22 ± 2)℃		热井水泥(75 ± 3)℃		冷井水泥	热井水泥	
	干灰密度	固井水泥浆密度	冷井水泥	热井水泥	初凝时间	终凝时间	初凝时间	终凝时间	(22 ± 2)℃	(22 ± 2)℃	(75 ± 3)℃
< 15	3.05 ~ 3.20	1.80 ~ 1.90	≥16	≥17	3:00 ~ 7:30	初凝后不迟于 3:00	1:45 ~ 2:45	初凝后不迟于 1:30	2.7	1.8	6.2

为了检查固井质量,在固井后 20 ~ 36h 内进行井温测量,或完井后进行声幅测井。水泥浆凝结 72h 后,进行套管的内、外试压。

(3)盐井完成

包括完井和洗井,下中心管和内套管,安装井口装置,进行试采。

①完井与洗井

完井:有先期完井法和后期完井法。先期完井法是先将技术套管下到盐类矿层顶部,用油井水泥固井后,再用饱和盐水作冲洗液,钻穿岩类矿层。优点是施工较方便,可提高固井质量,含盐段井底较干净。后期完井法是钻穿盐类岩层后,再将技术套管下到盐类矿层顶部,用油井水泥固井。优点是便于进行盐类矿层对比,这对于采用井组连通

法开采的钻井尤为重要,可以较准确地确定技术套管下人的位置,常在地层产状和矿层厚度变化较大、矿层层数多而厚度薄时采用,以及在新采区进行钻井施工时采用;缺点是固井时需打悬空水泥塞,当其下沉时影响固井质量。

洗井:钻穿盐类矿层后,必须用饱和盐水或清水进行充分洗井,直到洗井液中含砂量小于5‰为止。

②下中心管与内套管。用简易对流法开采的井,需下中心管(即石油系统的油管),用油(气)垫对流法开采的井,除下中心管外,还需下内套管。

③井口装置。它是装在地表用以悬挂中心管柱和内套管管柱,控制和引导地面流体(淡水或柴油)注入、井下卤水流出的设备,它的结构见图5-6和图5-7所示。

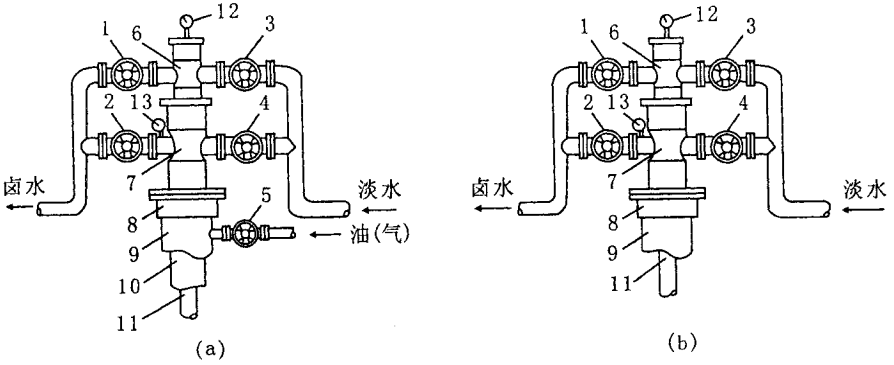


图5-6　对流法开采井井口装置

(a)油(气)垫对流法开采非井口装置;(b)简易对流法开采井井口装置

1~5—阀门;6—小四通;7—大四通;8—表层套管;9—技术套管;

10—内套管;11—中心管;12、13—压力表

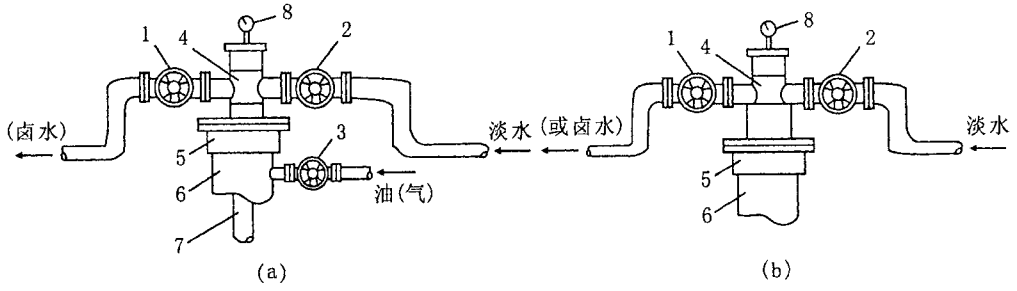


图5-7　井组连通法开采井井口装置

(a)加油垫控制上溶;(b)未加油垫控制

1~3—阀门;4—四通;5—表层套管;6—技术套管;7—中心管;8—压力表

④试采。用对流法开采的盐井，井口装置安装好后，用一定量的淡水进行试采（建槽），定时取样观测并记录卤水浓度上升情况，当卤水达到一定的浓度时即可结束试采。

（4）钻井资料整理及完井交接

编写钻井施工总结报告、完井地质报告和试采小结，并向生产单位移交。

第三节　钻井水溶开采法

钻井水溶开采法可分为抽汲采卤法、单井对流水溶开采法、井组连通水溶开采法。

一、抽汲采卤法

以一口井或一组井为开采单元，往一口井内注入淡水溶解盐类矿物，再从该井或其他井用抽油机或潜卤泵抽汲卤水的开采方法。

抽油机采卤工艺简单成熟，设备简单，基建投资少，维修管理方便，但产量低，生产成本高，目前仅用于中低产井的开采。潜卤泵采卤的产量高，卤水成本低，是盐类矿床推广应用的一种重要开采方法。

（1）潜卤泵及配套设备

潜卤泵机组由多级离心泵、保护器和潜没电机组成，三者的外壳用法兰盘连接，整个机组连接在泵挂的下端，泵挂上端悬挂 配，在井口装置上，它的安装见图 5－8。国产潜卤泵外径有 95mm 和 104mm 两种，扬程为 300～2000m。

（2）潜卤泵采卤工艺流程

淡水经采卤泵房通过井口装置进入井下盐层，溶解的卤水由井下潜卤泵排到地面卤水池。

（3）潜卤泵的选择

步骤如下：根据盐井技术套管尺寸确定潜水泵外径，根据盐井的产卤能力确定潜卤泵的排量，计算潜卤泵采卤所需总扬程，它应等于井口到潜卤泵工作时的动液面深度、井口至卤水池的高差、卤水从井下输送至卤水池的管路沿程摩阻损失这三项之和。

（4）潜卤泵采卤法的优缺点及适用条件

采卤工艺简单成熟，卤水产量较大且稳定，非密闭性盐类矿床开采的生产成本较低，但基建投资较大，设备维修技术要求较高。

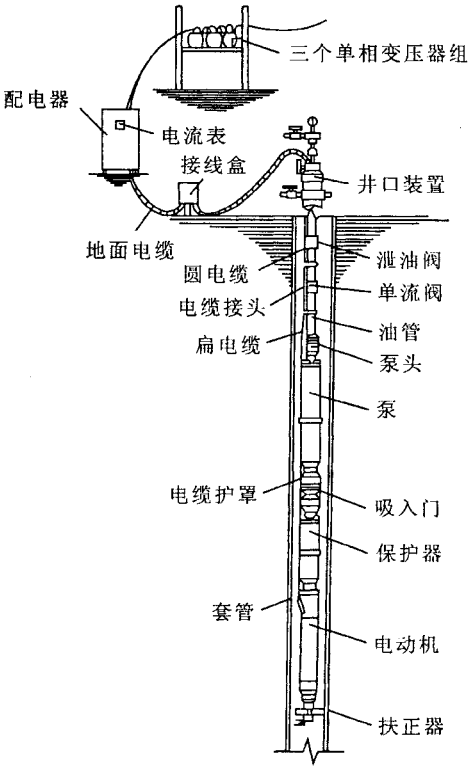


图 5－8　潜卤泵的安装

适用于非密闭状态盐类矿床开采，如盐井的技术套管不密封，或矿床中断层裂隙发育，或开采后期顶板垮塌导致地面下沉与冒卤等。开采卤水的液面从数十米到 3000m 以上，卤水产量从几十到 1000m^3/d。

二、单井对流水溶开采法

它是以一口井为一个开采单元，可分为简易对流水溶开采法、油垫对流水溶开采法和气垫对流水溶开采法。

（1）简易对流水溶开采法

在井内两层同心管的密闭系统中，从其中一层管内往井下注入淡水，溶解盐类矿物，生成卤水，利用注水余压使卤水从另一层管送到地面，而对井下盐层的溶解作用不加控制的采矿方法（图 5－9）。

①盐井布置。根据最大溶采直径确定井距，取为溶采直径的 1.5 倍，控制在 100m 左右，呈梅花形布置，井间未溶矿层留作保安矿柱。单井之间溶蚀连通后，可改用井组连通

法开采。由于我国多属碎屑岩系中的盐类矿床，顶板与上覆岩层为不稳固的砂岩和泥岩，矿层大面积溶通后，易造成顶板垮塌，因此，连通开采单元以 2—3 口井组较适宜，开采单元之间需保留保安矿柱。

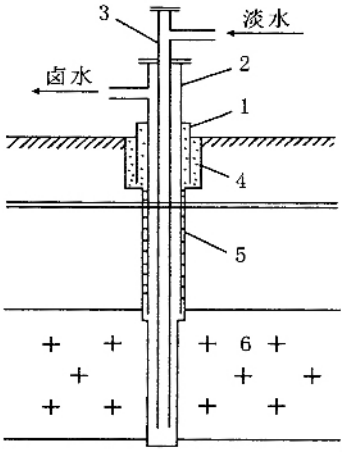


图 5－9　简易对流井井身结构示意图

1—表层套管；2—技术套管；3—中心管；4—固井水泥；5—井径；6—盐类矿层

②中心管柱。简易对流井需在技术套管内下中心管柱，悬挂在井口装置上。

a)中心管与技术套管的管径配合。中心管的内径为 40.3～88.6mm，一般取中心管的内横截面积为技术套管的二分之一左右。

b)中心管柱的下入位置。一般中心管下至开采盐类矿层的下部。若采矿层厚度大于 10m，中心管的管鞋下到矿层底板上方 0.5～1m；当开采层厚度为 1～2m 时，下到矿层底板上方 0.2～0.3m。若矿石品位高，可尽量接近矿层底板；反之，为防止水不溶残渣埋管和堵管，可提高 0.3～0.5m。

c)下中心管。油管在地面进行清水 25MPa 压力试压，全面检查合格后，配好管柱，在钻开水泥塞和矿层、清除井底沉砂、提升钻具后，立即下中心管至设计深度，做好记录。

③水溶开采主要设备。主要设备是离心泵，具有体积小、重量轻、转速快、效率高、流量大、操作简单、运行可靠和维修方便等优点。常用的采卤离心泵主要是 D 型、DG 型单吸多级节段式离心泵。泵型选择决定于卤水产量，井深和井下管柱配合直径，地面管线直径和长度等，主要根据水泵的总注水量及其扬程。水泵的总注水量确定后，应确定输水管道的流速。水溶开采矿山管道一般选用的流速范围见表 5－5。通常根据有关设计参数经过计算后进行泵型选择，进而选择其他配套设备。

表 5－5　水溶开采矿山管道一般选用的流速范围

管道安装位置	常用管道内径(mm)	流速(m/s)
水泵吸水管	DN < 200	1 ~ 1.2
水泵出水管	DN < 200	1.5 ~ 2
地面管汇	DN < 300	0.5 ~ 1
井下中心管	DN < 100	1.5 ~ 2

④简易对流法开采工艺。工艺流程为:采卤泵房内的水泵将淡水池内的淡水抽出,经淡水管道、井口装置,从中心管注入井下,溶解盐类矿物,生成卤水,利用余压使卤水从中心管与技术套管环隙送到地面,经井口装置、卤水管道汇集到卤水池。主要工艺参数有:采注比(同一时间内采出卤水量与注入淡水量的比值)一般为 0.8 左右,这是由于水溶盐类矿层形成溶洞会增大体积,且地层裂隙会充水与漏水;盐井日生产能力 A_0 取决于有效溶解面积 $F(m^2)$和溶解速率 $W(kg/(m^2 \cdot h))$。日生产能力为:

$$A_0 = 24FW \tag{5-5}$$

W 可以通过试验确定,或按下面试验公式计算:

$$W = 5.87\left(1 + \frac{1}{22.4}\right) \tag{5-6}$$

式中　T——溶解时的井下温度,℃。

⑤简易对流井的生产阶段

a)建槽期。指从注水溶解矿层开始,到建成一定的溶洞,采出的卤水浓度和产量达到设计生产能力的时间,一般为 1 ~ 6 个月。

b)生产期。连续注淡水能生产符合工业要求的卤水,一般占盐井服务年限的 70% ~ 80%。

c)衰老期。水采溶洞已接近最大可采直径,顶板垮塌,底部堆积大量碎屑物,卤水浓度产量下降,占盐井服务年限的 15% ~ 20%。

⑥简易对流法的优缺点及适用条件。优点是:开采工艺简单,操作容易,适用性强,基建投资少,生产成本低。缺点是:服务年限短,一般为 2 ~ 3 年;溶洞呈倒锥体,顶板暴露早,易垮落,影响矿石溶解,矿石采收率低,井下事故多,中心管下部常发生弯曲、变形和断裂,顶板垮塌导致技术套管变形甚至断裂。适用于矿层顶板较稳固,密封条件好,未受成矿后的断层破坏,晶位较高的易溶性盐类矿床,矿层厚度 2m 至数十米,开采深度 3000m 以内,适于小型矿山,在大型矿山只适于作辅助开采方法。

(2)油垫对流水溶开采法

该法以一口井为一个开采单元,利用油水不相容、石油密度小且不溶解盐类矿物的

特性，在井内三层同心管的密闭系统中，间歇性地从技术套管与内套管环隙注入石油，使其在水溶开采溶洞顶部形成一个很薄的油垫层，将水与矿体隔开，控制上溶，迫使溶解作用往水平方向进行，当建立的圆盘状盐槽达到设计的溶采直径后，再自下而上地进行水溶开采。从内套管与中心管的环隙（或中心管）注入淡水，溶解盐类矿物，生成卤水后，再利用注水余压使卤水从中心管（或内套管与中心管环隙）送到地表（图 5－10）。

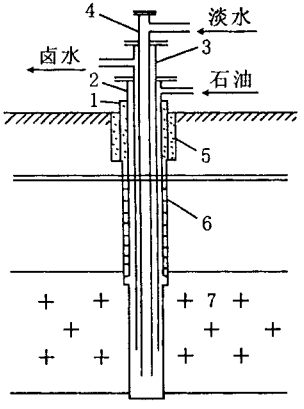


图 5－10　油垫对流井井身结构示意图

1—表层套管；2—技术套管；3—内套管；4—中心管；5—固井水泥；6—井径；7—盐类矿层

①井下管柱。技术套管下人开采矿层顶板，用油井水泥封固开采矿层以上地层，经钻开矿层并洗井后，再分层下入内套管柱和中心管柱，它们悬挂在井口装置上。中心管柱和内套管柱下人的初始位置主要决定于矿层厚度和开采目的，矿石品位也有一定影响。开采单层厚度小于 50m 时，中心管下人的初始位置为底板上方 0.5～1m，品位高时可适当降低。内套管下人初始位置要比中心管高 1.5～2m，两口距离决定着矿层的溶采高度。建槽期的溶采高度称为建槽高度。当终极目的是用于储存石油或天然气等时，常留出一定厚度的护底盐和护顶盐。

②油垫对流法开采工艺。比简易对流法增加了注油、油水分离及回收系统，其工艺与简易对流法基本相同。

③油垫对流法开采主要设备。为 D 型、DG 型单吸多级节段式离心泵，注油泵，储油罐和油水分离池。水溶开采溶洞顶部的油垫层厚仅 2～3cm，所需注油量不大，常选取排量较小的 DY 型、YD 型单吸多级节段式离心冷油泵或 DJ 型单吸多级节段式离心输油泵，配以防爆电机，常采用间歇性注油。一般采用圆形卧式储油罐。大型水溶开采矿山集中控制的采卤泵房，储油量为 100～200m^3 即可。含油卤水抽到地表后，在油水分离池将油与卤水分离后，油料可以重复利用。常用的分离方法是平流式重力法。

④油垫对流井的生产阶段

a)建槽期。用严格控制上溶的方法,迫使溶解作用向水平方向进行,在开采矿层底部建造一个有一定直径的圆盘状溶洞,为上溶生产创造条件。在矿石晶位大于90%、厚度15m以上的盐类矿层,建槽直径为60~80m,需1年左右时间。

b)上溶生产期。建槽完成后,可以排除油料,提升中心管和内套管,进行上溶开采。提升井管的间隔时间根据溶采直径达到设计要求而定。提升井管的方法有两种:连续提升井管法和分梯段提升井管法。前者每天提升井管一次,每次提升高度15~20cm,耗时5~10min。此法建成的溶洞近似圆柱状,矿石采收率较高,溶洞顶板呈穹窿状,不易塌陷,耗油量较小,每吨盐约1.5kg,但因操作繁杂,劳动强度大,较少采用。后者按4~6m的高度提升井管,建成的溶洞洞壁呈锯齿形,耗油量为每吨盐3kg,操作简单,劳动强度小,应用广泛。上溶生产期短的数年,长的数十年。

c)衰老期。矿层开采至最上部,矿层顶板暴露甚至垮塌,溶解面缩小,导致生产能力下降,最后停采。

⑤油垫对流法的优缺点与适用条件。优点是:建成圆盘状盐槽后,形成有利的顶溶面,卤水产量大,浓度高,生产能力比简易对流法高;可有效控制上溶,防止矿层顶板过早暴露和垮塌,延长盐井服务年限;溶洞形状可控,可建成近似圆柱状溶洞,矿石采收率可达25%~35%。缺点是:建槽时间较长;矿石品位越低,油耗越大;常发生井下管柱弯曲、变形和断裂事故。油垫对流法在矿石晶位大于70%、矿层厚度大于15m的易溶性盐类矿床广泛采用。

(3)气垫对流水溶开采法

以一口井为开采单元,利用空气密度小的特性,在井内三层同心管的密闭系统中,从技术套管与内套管环隙输入压缩空气,使其在溶洞顶部形成气垫层,将水与矿体隔开,以控制上溶,迫使溶解作用往水平方向进行。目前主要在坑道开采的老矿山应用。

①气垫对流井的布置。在开采坑道内布置气垫对流井时,盐井从井田边界逐步向井筒中心推进。在下部没有坑道和水溶硐室的情况下,集中布置井组,井组相互平行,并与开采坑道、水溶硐室方向平行(图5-11)。在地面布置气垫对流井时,应与老采区保持一定距离,盐井呈等边三角形布置,井距70m,溶采直径50m,留保安矿柱20m。

②井下管柱。与油垫对流井基本相同,井身结构如图5-12所示。与油垫对流井比较,特殊性表现在以下三个方面:

a)增设了井口圆台。圆台外径0.7~1.5m,深约1.7m,为钢筋混凝土结构,圆台、技术套管与下方的固井水泥形成一个整体,增强了技术套管的承载力,并使盐井处于密封状态。

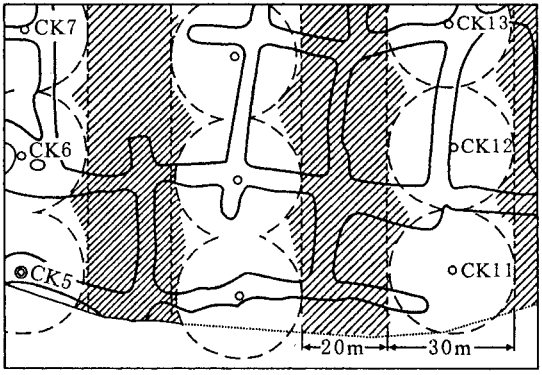


图 5－11　乔后盐矿坑道内气垫对流井布置

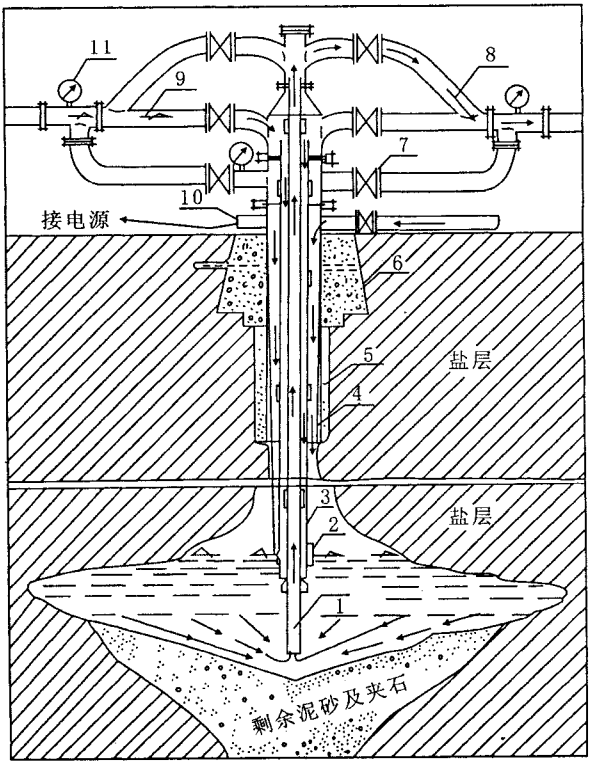


图 5－12　乔后盐矿坑道内气垫对流井井身结构及井口装置

1—中心管(φ76mm×4mm);2—喷嘴;3—内套管(φ108mm×4.5mm);4—技术套管(φ219mm×9mm);5—固井水泥;6—混凝土圆台;7—控制闸阀;8—卤水;9—淡水;10—水位控制器;11—压力表

b)技术套管与内套管的环隙大,内套管与中心管的环隙小,以适应矿石品位低、泥砂含量高的情况。

c)中心管下入的初始位置低,距矿层底板 0.5 ~ 1m,压缩空气可以 . 将泥砂上举清除。

③气垫对流法开采工艺。与油垫对流法基本相同,只是注油系统改成了压缩空气输入系统。由于空气的压缩比大,输入井后随压力的减小而膨胀,形成的气垫层很不稳定,为此,从技术套管与内套管环隙下入水位测线,测定溶洞的水位,用调节输气压力和输气量的方法控制水位,以保证建槽高度。含气混浊卤水出井后,进入气水分离槽,使气体逸出,混浊卤水转入沉清池,达到工业要求后输入卤水池。

④气垫对流法开采的主要设备。所需主要设备与简易对流法相同,所需特殊设备为空气压缩机。

⑤气垫对流井的生产阶段。可分为建槽期、上溶生产期和衰老期。这里只介绍前两个时期。

a)建槽期。气垫法用于中低品位盐矿开采,应在建槽期尽可能多地带出泥砂,加快溶解速度,在短期内建成盐槽。常用的建槽方法有气垫对流法和气垫喷射法。

气垫对流法是从技术套管与内套管环隙输入压气,用水泵往内套管与中心管环隙注入淡水,利用注水余压从中心管输出卤水,主要用反循环作业,配合使用正循环。优点是设备安装、调整管位及处理事故较方便,矿石溶解速度快,带砂能力强。缺点是随盐槽直径的增大,溶解速度下降,带砂能力减弱,盐槽侧溶底角逐渐增大,压气耗量大,气垫层不易控制,稍不注意就形成上溶,易发生堵管、埋管事故。

气垫喷射法是在内套管下端、距内套管鞋约 8cm 处安设喷嘴,并在内套管鞋处用垫圈将内套管与中心管环隙封堵,使从环隙注入的淡水从喷嘴喷射出去,溶解矿石生成卤水,利用注水余压使卤水从中心管输出井口。优点是盐槽侧溶底角较小,在喷射液的有效射程内矿石溶解速度快,建槽时间较短,矿石采收率较高,盐井服务年限较长。缺点是升起、下放内套管和中心管以及调整两口距离都不方便,内套管鞋处与中心管之间如果密封不好会造成进水短路。

b)上溶生产期。可进行间歇性上溶生产和分梯段连续上溶生产。前者是指生产不连续,周期性生产,特点是井内不需气垫层,只需技术套管和内套管,淡水从内套管注入井内,进行静溶,溶解盐槽顶部和侧壁的矿石,约经 7 天,再从技术套管与内套管环隙输入压气,把全部卤水从内套管排除,经澄清后输至卤水池,再注水溶盐,如此循环,间隙进行上溶生产,不断扩大盐槽直径和高度,增大盐槽容积,为分梯段连续上溶生产创造条件。当盐槽高度达 4.5m 以上、直径达 20m、容积达 800m^3 以上时,即可进行分梯段连续上溶生产,此时井身结构为三层管,开采梯段高度为 6 ~ 8m,分梯段上溶。

⑥气垫对流法的优缺点及适用条件。优点:建成一定容积的盐槽后,分梯段上溶生产的卤水浓度高,产量高于简易对流法;盐井服务年限较长;溶洞形状基本可控,矿石采收率可达 25% ~ 35%;气举卤水带砂能力强。缺点:空气压缩比大,气垫层不稳定,凋控较难;需连续输气,压气消耗大,建槽成本高;建槽期较长;卤水中溶解的空气较多,采卤设备和井下管柱腐蚀严重。适于开采矿石品位较低,泥砂等水不溶物含量较高,矿层厚度大,埋藏深度较浅的易溶性盐类矿床。开采深度多在 60 ~ 70m。

三、井组连通水溶开采法

以两井或多井为一个开采单元,用各种方法在井间矿层中建造溶蚀通道,从其中一口井注人淡水以溶盐。再利用注水余压使卤水从另一口井输到地面。根据建造通道的方法不同,可分为对流井溶蚀连通法、压裂连通法和定向井连通法。

(1)对流并溶蚀连通水溶开采法

根据单井对流水溶开采时是否控制上溶以及控制上溶的方法不同,可分为自然溶蚀连通法、油垫建槽连通法和气垫建槽连通法。

①自然溶蚀连通水溶开采法

各井早期用简易对流法开采时,对井下矿层的溶解作用不加控制,当两井或多井溶蚀连通后,采用井组连通法开采。优点:可以起出中心管,简化井身结构,减少并下事故;提高卤水浓度,增大产量,开采薄矿层时尤为显著;有助于提高矿石采收率。缺点:简易对流法开采井要到生产后期才能在溶洞的上部连通,溶洞侧溶底角以下的矿石难以继续溶解,影响矿石采收率。适用于开采矿石晶位较高的盐类矿床,成为简易对流法矿山后期开采的重要方法。当矿石晶位较低时,因为溶洞的侧溶底角较大,难以实现溶蚀连通。

②油垫建槽连通水溶开采法。以 2 ~ 3 口井为一组,各井先在矿层下部用油垫对流法建槽,控制上溶,拓展侧溶,促使邻井在矿层下部溶蚀连通,采用井组连通法开采。这种方法虽然存在连通时间较长和耗油等缺点,但具有连通部位可控,卤水产量大(40 ~ 50m^3/h)、浓度高(NaCl > 300g/L),矿石采收率高(20% ~ 30%),盐井服务年限较长等优点,具有先进性。适用于矿层厚度较大、矿石品位较高的盐类矿床。

③气垫建槽连通水溶开采法。以两口井或多口井为一组,各井先在矿层下部用气垫对流法建槽和生产,通过间歇性上溶生产或连续上溶生产,扩大溶洞直径,使两井或多井在矿层下部溶蚀连通,再分梯段连续进行上溶生产,从一口井注入压缩空气和淡水,溶解矿物,生成卤水。利用压缩空气膨胀和注水余压把卤水从另一口井送到地面。优点与油垫建槽连通法相同。缺点是:为使气垫层较稳定,需连续输气,动力消耗多;卤水中溶解

的氧较多,使井下管柱和采卤设备腐蚀严重,使用寿命短;因压缩空气的压力有限,开采深度受到制约。

(2)水力压裂连通水溶开采法

在开采同一矿层时,以两口井或多口井为一开采单元,利用水传递压力,从其中一口井注入高压淡水,压迫矿层形成裂缝与另一口井贯通,并将裂缝迅速溶蚀冲刷,扩展形成压裂通道,然后采用井组连通法开采。

裸眼井段地层在高压水的作用下形成的裂缝与岩石的力学性质、地应力、压裂缝的性质和注入方式等有关。借助声幅测井、三维地震测井等技术,可以测定裂缝的方向。

①压裂井组的布置

a)压裂井组的布置方向。压裂裂缝在两井贯通需具备两个条件:一是形成的主裂缝为水平裂缝;二是压裂井组布置方向与压裂裂缝延伸方向基本一致。通常,压裂裂缝的延伸方向主要取决于矿区的褶皱构造、原始裂隙发育方向、矿层层理、矿层倾角等地质构造因素。如沿背斜轴部的张裂隙方向布井,容易压裂连通;当矿层倾角大于10°时,沿矿层倾向布井容易压裂连通;我国广布的陆相多层、薄层盐类矿床、矿层与围岩之间的层理面易于形成水平裂缝,应充分应用;应尽量避开断层、裂缝带布井。

b)压裂井组的布置形式。井组可布置成梅花形、四方形、三角形,以及成排布置和对井布置,实践中多采用对井布置和三角形布置。前者的工程量少,能控制较多的开采矿量,适于浅埋薄层的多层矿床的压裂。在单一矿层或埋深大于1000m的矿层难以实现压裂连通的情况下,采用三角形布井,有助于提高压裂连通的概率。

c)压裂井的井距与组距。一般为100~200m,根据具体情况合理确定。压裂井组的间距一般为井距的1.5~2倍。

②压裂层段的选择与技术套管的下人位置。要求矿层五分支复合现象,压裂井之间矿层的构造简单,无断层通过,压裂段选择在易于形成裂缝的薄弱部位,矿层结构较疏松、抗压与抗剪强度较小的部位,矿层微裂隙发育的部位等。均质石盐矿层不宜选作压裂部位。通常技术套管的下人位置有下列3种情况:

a)开采较均质的单层盐类矿床时,压裂层段选择在开采矿层的底部,压裂井技术套管下至距矿层底板2~3m处,目标井技术套管下人开采矿层上部,进入矿层2~3m处,目标井的矿层裸露,在矿层底部形成压裂通道,自下而上地进行溶解开采,可获得较高的矿石采收率。

b)开采薄层多层盐类矿床时,压裂层段选择在矿层下部、矿层与非矿夹层之间的层理发育部位,压裂井技术套管下至矿层下部,目标井技术套管下人开采矿层顶部,目标井

的矿层裸露,在矿层下部形成压裂通道。

c)压裂井和目标井的技术套管均下人开采矿层底板,并用油井水泥封固,然后在选定的压裂部位割开套管与水泥环。进行压裂连通。

③压裂工艺与主要压裂设备。工艺流程为先用压裂车上的水泵将淡水加压,经高压管道输送至压裂井井底,对压裂层段持续施压(图5-13),破裂压力一般为9~11MPa,使之破裂形成裂缝。贯通后改用固定式高压泵持续注水,溶解、冲刷、扩展裂缝,使之形成一定直径的溶蚀通道。当注水量与出卤量基本平衡,注水压力降为正常采卤压力时,改用常规采卤设备投入正常生产。移动式压裂设备安装在汽车上,机动性好,安装简单,操作方便,便于及时观测各井口压力与出卤的动态变化。缺点是露天作业,工作条件与设备维修条件较差,施工费用较高,一般只在注水压力高的压裂阶段使用。固定式压裂设备主要是柱塞泵和离心泵,一般安装在泵房内,可长时间连续使用,操作与维修方便,运行费用低,但需安装地面专用高压管线,增加了磨阻损失,适用于注水压力较低的裂缝扩展阶段。

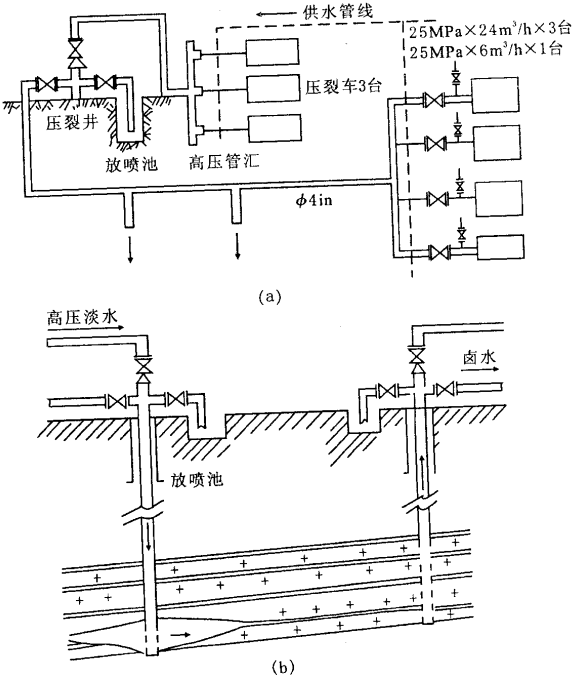


图5-13　压裂工艺流程示意图

(a)压裂井场布置;(b)井下压裂连通剖面

④常用压裂作业方法分类。根据井内注液通道不同,可分为:

a)中心管压裂:从中心管注人高压水进行压裂。由于管径小,摩阻损失较大,仅用于埋深小于 1000m 的盐井。或井下需进行水力喷射切槽和下封隔器时使用。

b)套管压裂:井内不下中心管,直接从技术套管内注入高压水进行压裂,管径较大,摩阻损失较小,适用于中深并的压裂。

c)中心管与套管环隙压裂和环隙与中心管混和压裂:同时从环隙和中心管注入高压水进行压裂。前者多用于浅井,后者多用于深井。

⑤压裂建井。可分为以下三个时期:

a)压裂期。从向压裂并注入高压水,到形成裂缝、裂缝延伸并与目标井贯通为止。可细分为破裂压裂阶段和压裂连通阶段。决定破裂压力大小的主要因素有矿层埋藏深度、矿层结构、压裂层是否堵塞等,大致为 9~21MPa。压裂作业开始时,注水压力迅速升高至峰值,当开始形成压裂裂缝时,注水压力骤降。继续注水迫使裂缝向远处延伸,与目标井贯通,有卤水流出,一般需要几小时到几天。

b)扩展期。压裂裂缝的扩展,主要是借助高压淡水的溶解和冲刷作用,一般要几天到几个星期。

c)生产期。当注水压力骤降到正常采卤压力、出卤量骤增到近于与注水量相等,即可进行正常采卤。

⑥压裂连通法的优缺点与适用条件。优点是:所需钻井数量少,井径较小,节省一套中心管,节约钻井费用;生产的卤水浓度高、产量大、成本低;井下事故较少;矿石采收率较高。缺点是:受地质构造的制约,不能有效控制压裂主裂缝的延伸方向和连通部位;易造成邻近井组间压裂窜槽和地层充水。适用条件是:浅埋的矿石品位高的易溶盐类矿床;产于碎屑系中的多层、薄层盐类矿床,矿层顶底板砂岩与泥岩具有较高的抗压和抗剪强度,并具有良好的隔水性;产子碳酸盐系中的盐类矿床,矿层的层数少,直接顶底板为硬石膏、白云岩、石灰岩,矿层与底板界面清晰。最大开采深度在 1500~1700m。

(3)定向井连通水溶开采法

目前使用的主要是定向直井连通法,开展了径向水平井连通法的试验研究,并向智能化发展。

①定向直井连通开采法。以两口并为一个开采单元,其中一口并先垂直往下钻进,进入矿层顶板即开始造斜,逐渐转为水平井,朝垂直目标井进行定向钻进,或两口垂直井进入矿层顶板后,转为水平井朝设计的同一目标钻进。由于两井直接贯通的概率几乎为零,一般需在一口井的下部先行建槽,另一井与槽对接(图 5-14),用井组连通水溶法生

产。优点是:井组的连通方向和连通部位基本可控,中靶误差在 2m 以内;矿石采收率高,可达 40%;井组生产能力大,可达 30 ~ 40m^3/h;卤水浓度高,在 300g/L 以上;井距大,控制的可采矿量多,服务年限较长,投资省。缺点是:钻井轨迹以下的矿石无法开采,约造成 20%的矿量损失;不控制上溶,易上溶至顶板,影响矿石采收率,难以充分发挥井组的生产潜力。适用于开采矿层较厚的盐类矿床。湖北沙隆达股份有限公司成功应用这种方法实现了对赋存在地表以下 2545 ~ 2612m 的超深盐矿层的井组连通水溶开采。

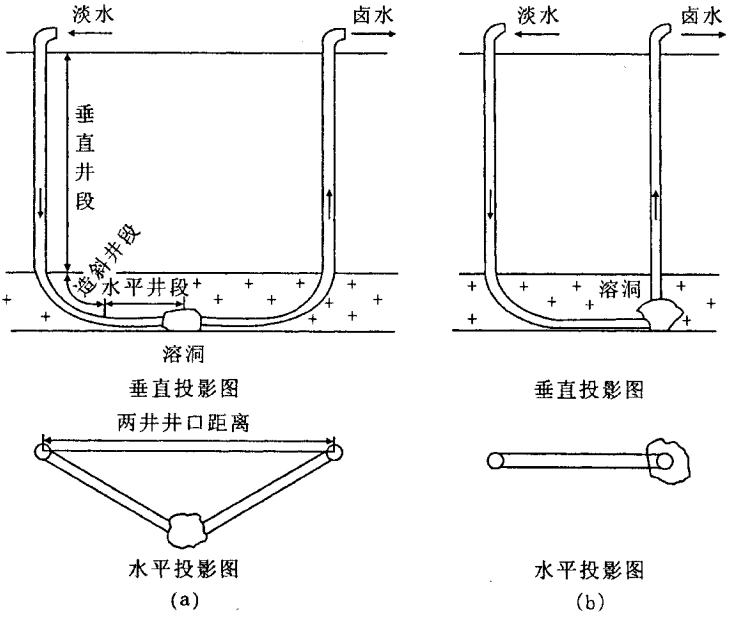


图 5 – 14　中小半径水平井连通水溶开采法

(a)两口中小半径水平井连通;(b)中小半径水平井与直井连通

②径向水平井连通水溶开采法。以两口井为一个开采单元,其中一口井先垂直往下钻进,进入矿层下部后,借助造斜器拐 90°的弯,以 0.3m 的超短圆弧半径由垂直井转为水平井,朝垂直目标井进行定向钻进。使两井在矿层下部连通,用井组连通水溶法开采。由垂直井转水平井时,先在垂直井的下部矿层中建成直径 600mm 以上的溶洞,将造斜器下入溶洞中,把它由垂直方向转向水平方向,注入高压淡水射流,溶解盐类矿石,把卤水送到地面,在矿层底部建成水平井段,与目标井贯通,用井组连通水溶法开采。造斜器是由滑道和滑轮组成的双曲线导向机构,各节支架的伸缩是依靠提拉侧板去完成(图 5 – 15)。这种方法的钻进方向和部位基本可控,连通时间短,费用较低;卤水的浓度高,产量大;矿石采收率高,是极具发展潜力的水溶开采新技术。

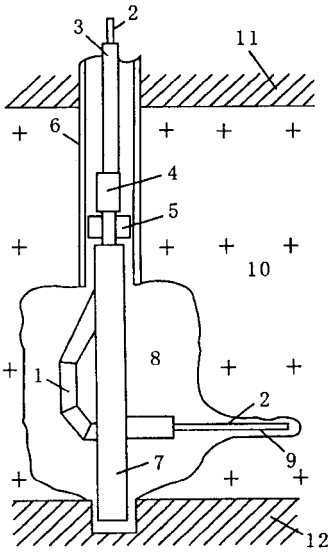


图 5－15　径向水平钻进

1—造斜器；2—高塑性钢管；3—高压油管；4—速控器；5—卡爪；6—技术套管；7—造斜器侧板；8—盐层溶洞；9—水平井段；10—盐类矿层；11—盐层顶板；12—盐层底板

第四节　硐室水溶开采法

这是在地下房柱采矿法的基础上发展起来的一种水溶开采方法。先在矿体中建造一定容积的原始硐室，作为初始溶解面，将淡水注入硐室，进行水溶开采。

一、矿床开拓与采准

与地下房柱采矿法相似，中段高度 25～30m，垂直矿体走向布置 4～5 个溶区和保安矿柱，溶区宽 30～38m，保安矿柱宽 40～52m，长几十至 100 多米。溶区内开掘 2～3 个初始硐室，硐室高 2.5～3m，硐室间留 1～2 个宽 5～9m 的临时小矿柱，防止硐室建造期间顶板下沉。上溶开采过程中，小矿柱被逐渐溶采完（图 5－16）。安装好注水、抽卤、输卤管道和配套设备，即完成采准工作。

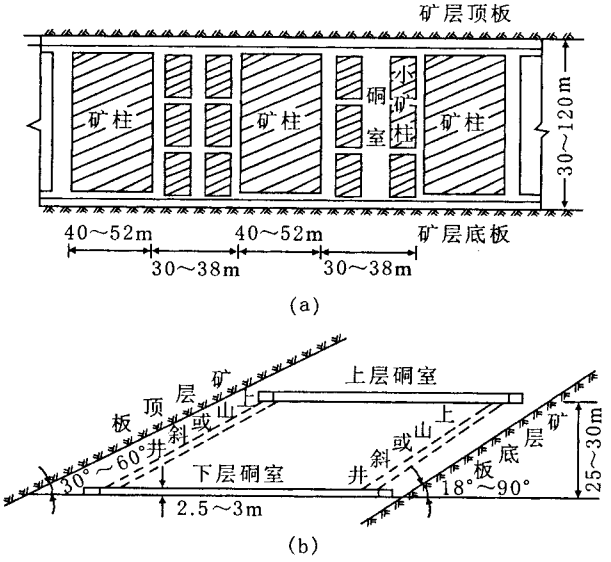


图 5－16　水溶硐室布置示意图

(a)水溶硐室平面;(b)水溶硐室剖面

二、水溶回采

回采顺序是在水平面上为后退式,在垂直面上为上行式。回采时将淡水输入并充满初始硐室,以溶解顶部和侧壁矿石。矿石品位高,溶解时间较短。含 NaCl 30%的矿石达到饱和约需 15 天。加工厂要求采卤连续进行,在连续注水和连续抽卤过程中,硐室内水体处于缓慢流动状态。由于硐室内卤水存在上淡下浓的密度差异,形成平整的侧溶面和侧溶底角(图 5－17),后者的大小与矿石的品位有关,品位高时侧溶底角小。泥砂、砾石等残渣堆积于硐室底部,整个硐室呈倒锥体形向上扩展,直到溶采高度为止,中段矿石的采收率可达 40%。留下 5～6m 厚的矿房顶板。本中段开采结束后,转入上一中段的开采。

三、硐室水溶开采主要工艺参数

(1)上溶速度

始终保持溶液与硐室顶板矿石的接触,是获得高浓度卤水的关键。矿石含 NaCl 30%左右,月平均上溶速度为 0.8～1.0m;晶位 50%左右,月平均上溶速度为 1.5m。

(2)硐室顶溶面积与产卤量

硐室的溶解作用主要是上溶,硐室的顶溶面积、矿石品位与产卤量有密切的关系。

矿石含 NaCl 30%左右,硐室顶溶面积每 $10m^2$ 可日产含 NaCl 17%的卤水 1t;当矿石含 NaCl 50%左右,则顶溶面积 5～$7m^2$ 就具有相同的产量。

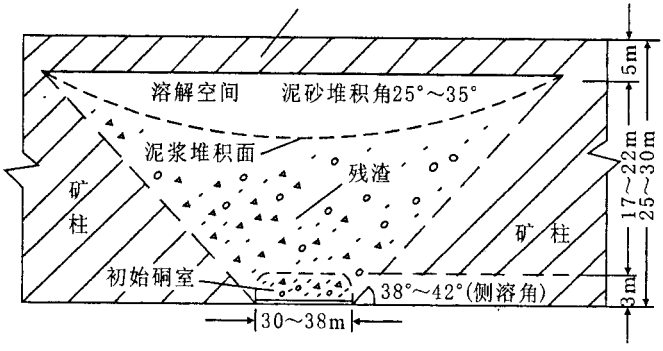


图 5－17　水溶硐室示意图

(3)侧溶底角与水不溶残渣堆积安息角

矿石侧溶底角的大小与矿石晶位、水溶状态(动溶或静溶)有关。一平浪盐矿的矿石含 NaCl 29.44%,侧溶底角为 38°～42°,一般 41°左右,水不溶残渣堆积安息角为 25°～35°,一般 28°左右。

(4)水采与旱采比例

硐室水溶开采的部分开拓工程和采准工程采出矿石,称为旱采。旱采矿石运到地面制盐的成本高于水采。旱采是硐室水溶开采必不可少的,水采与旱采比例控制在 4:1 较合适,这样的混合卤水的成本较低。

四、优缺点与适用条件

特低品位盐矿的水溶开采代替房柱法开采,减少了人力、物力消耗,降低了生产成本;矿渣大部分留在地下,充填采空区,可提高矿柱的承载能力,有利于防止地面沉陷,还减轻了地面的环境污染;溶矿开始后,工人不需进入采场,改善了安全生产条件;矿石采收率较高,可达 40%。缺点是开拓和采准工程量大,所需时间长,开采深度仅数百米。

适用于特低品位盐矿或溶解速度慢的盐类矿床如芒硝矿床的开采。

第六章　露天与地下联合开采

第一节　露天与地下联合开采的分类与特点

露天与地下联合开采是指在同一矿体范围内,既有露天开采又有地下开采。

一、露天与地下联合开采分类的依据

根据采矿工作在时间和空间上不同的结合方式进行分类。

(1)时间上的结合

露天和地下采矿工作在时间上的结合程度可以用时间结合系数是,表示,它是露天和地下同时生产的时间乙与矿床开采的总时间丁之比,即 $k_t = t_s / T$。

根据露天与地下采矿工作在时间上的结合程度,联合开采可分为三类:

①露天与地下采矿工作同时进行。自始至终是同时进行的,此时 $k_t = 1$。

②采矿工作部分同时进行。露天和地下的采矿工作中有一项先开始,然后同时进行,$0 < k_t < 1$。

③露天和地下采矿工作顺序进行。k_t 值等于 0 或接近于 0。因为在露天结束和地下开始阶段,可以利用联合开采的工艺特点,例如露天矿下部几个台阶的矿岩可以通过地下开拓巷道运出,可以利用地下崩落区堆放露天剥离的废石等,所以也属于联合采矿。此外,露天和地下过渡时间一般都不少于 3 ~ 5 年,所以通常 $k_t \neq 0$。

(2)空间上的结合

采矿工作在空间上的结合程度用空间结合系数 k_s 表示，它是露天和地下同时开采的矿床面积 S，与矿床开采总面积 S_a 之比，即 $k_s = S_s / S_a$。

图 6－1 中 l_0 和 l_u 分别为露天边界内和地下井田内矿床的平均长度。假设矿床沿走向全长的厚度相同，那么 k_s 就等于露天与地下同时开采的总长度与矿床总长度之比。

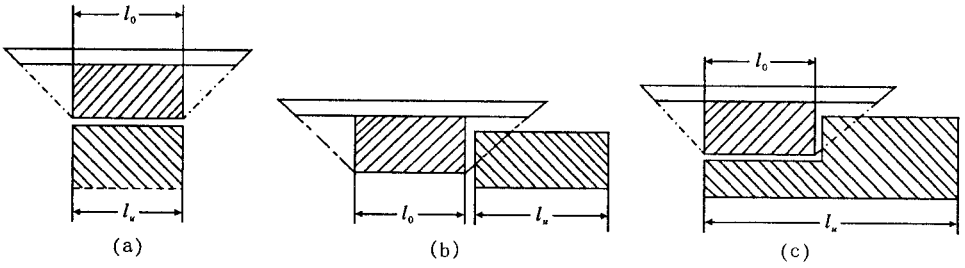


图 6－1　露天和地下开采在空间上的结合

按露天和地下采矿工作在空间上的结合程度，联合开采可分为三类：

①露天和地下开采在垂直面上在矿床全面积上进行。如图 6－1(a)所示，此时露天开采面积 S_0 等于地下开采面积 S_u，它们各自等于矿床开采面积 S_a。因此，空间结合系数 $k_s = 2$，为最大值。这种情况给露天和地下的开拓系统和采矿工艺的密切联系提供了有利的条件。

②露天和地下开采在水平面上独立进行。如图 6－1(b)所示，这种情况下 $k_s = S_s / S_a = (S_0 + S_u) / S_a \rightarrow 1$。在露天和地下开采的交界处，相互影响是很大的，整个矿床的开拓、采准、疏干、通风和其他工艺都可能有密切的联系。

③露天和地下开采在水平面和垂直面上同时进行。如图 6－1(c)所示，在矿床的部分区段两种开采工作在水平面上和垂直面上同时进行，此时 $1 < k_s < 2$。两种采矿工作之间可能出现比较复杂的相互影响与联系。

二、露天与地下联合开采的分类

根据露天和地下开采在时间上和空间上结合方式的不同，通常把联合开采分为：

(1)露天与地下同时联合开采。从设计开始就安排露天和地下同时开采。

(2)露天转地下开采。先用露天方法开采矿床的上部，然后过渡到用地下方法开采矿床的下部。

(3)地下转露天开采。先用地下方法开采矿床，然后过渡到用露天方法开采矿床。

三、矿床联合开采的特点

无论是露天开采或地下开采,都具有其独特的工艺特点。当矿床适合于采用露天和地下联合开采时,就应该充分利用这些工艺特点,以提高露天和地下开采的技术经济指标。

联合开采工艺系统的核心是在开采工作按一定顺序进行时,必须尽量考虑矿床的特点,选择露天和地下的联合开拓系统,露天和地下相互联系的开采工艺系统,共用地面辅助生产设施和生活福利设施,以提高矿山的经济效益。

露天和地下联合开拓的主要特点是最大限度地赋予地下巷道多种用途。深部露天矿开采的趋势是广泛利用地下巷道进行运输。

根据开拓和采矿在工艺上互相联系程度的不同,可把露天与地下联合开采的矿山分为三种类型:

(1)紧密联系

露天与地下在开拓和开采工艺上相互紧密联系。例如露天与地下的矿岩都通过地下井巷运出,这种情况下 $1 < k_s < 2$。

(2)中等联系

在开拓和开采工艺上只有部分区段是相互联系的。例如露天矿的部分矿石是通过井下巷道运出,或者地下部分矿石通过露天运输系统运出,这类矿山多数是 $k_s < 1$ 和 $0 < k_t < 1$。

(3)间接联系

露天和地下生产没有直接联系。例如露天只是利用地下巷道作为矿床的疏干、通风和探矿等,但在矿山的服务性与辅助生产设施方面仍有密切的联系。

技术上可行的联合开采工艺系统有:露天与地下联合使用地下巷道系统;露天矿利用地下巷道系统;地下矿石经露天运出;露天废石排入地下开采崩落区;各自独立的运输系统;用露天钻机回采露天坑底和边帮的矿石等。

近几十年来,露天转地下开采在国内外矿山得到了广泛的应用。对于这类矿山,为了保持矿山产量的平衡,当露天开采向地下开采过渡时,在一段时间内露天与地下需同时进行开采作业,这是这类开采法的最复杂与最核心的技术问题,这与露天与地下同时联合开采的基本条件是大致相同的。地下转露天开采只是在特殊条件下偶然使用。

对于急倾斜中厚以上的矿体,当矿体延深较大而覆盖层较薄时,矿体的上部通常先采用露天开采,然后下部采用地下开采,整个开采过程称为露天转地下开采。

在露天开采转为地下开采的过渡期，矿山由单二的露天开采转为露天与地下开采同时作业，必须充分采用各种技术与组织措施，减小过渡期对生产效率（一般下降 15% ~ 25% ）的影响。当露天矿生产进入减产期后，地下开采系统应当基本形成，并逐步承担露天矿减产部分的产量，使矿山产量基本保持稳定。

第二节　露天转地下开采

一、露天转地下开采的开拓系统

因为露天开拓系统已先期形成，露天转地下开采的开拓系统主要指地下开拓系统。应当强调的是，在设计地下开拓系统时，应尽可能地利用或结合露天开拓系统，以减少投资。

根据露天和地下采矿工艺联系的紧密程度，露天转地下开拓系统可分为露天和地下独立开拓系统、局部联合开拓系统、联合开拓系统三种类型。

（1）露天和地下独立开拓系统

在深部矿体储量大、服务时间长，或在露天开采深度大，露天采场的底平面狭窄，采场边坡稳定性差，难以保证井巷工程出口安全的情况下，地下开拓工程一般布置在露天采场之外，成为独立的开拓系统。它具有两套生产系统，相互干扰小，露天开采结束后无需继续维护边坡等优点。缺点是两套开拓系统的基建投资大，基建时间长。

白银厂铜矿和冶山铁矿在 20 世纪 60 年代由于露采设备供应困难被迫提前转入地下开采时，曾采用这种开拓方式（图 6 - 2 ）。

国内外实践表明，除在矿床地质与地形条件特殊的情况下采用外，一般很少采用这种开拓系统。

（2）局部联合开拓系统

①倾斜或急倾斜矿床残留矿体（包括露天矿底柱和挂帮矿 ）的开采，通常利用地下开拓系统运至地面。例如我国的铜官山铜矿、凤凰山铁矿和南非的科菲丰坦金刚石矿等。

②露天开采到设计境界后，下部矿体的储量不多，服务年限较短，通常自露天坑底的非工作帮掘进平硐、斜井或竖井形成地下矿体的开拓系统。如图 6 - 3 所示的平硐 - 斜坡道开拓地下矿体的系统，矿石经露天开拓系统运到选厂，具有井巷工程量和基建投资

少、投产快,可充分利用已建的露天开拓运输系统的优点。缺点是井巷施工与露天生产同步进行,干扰较大。

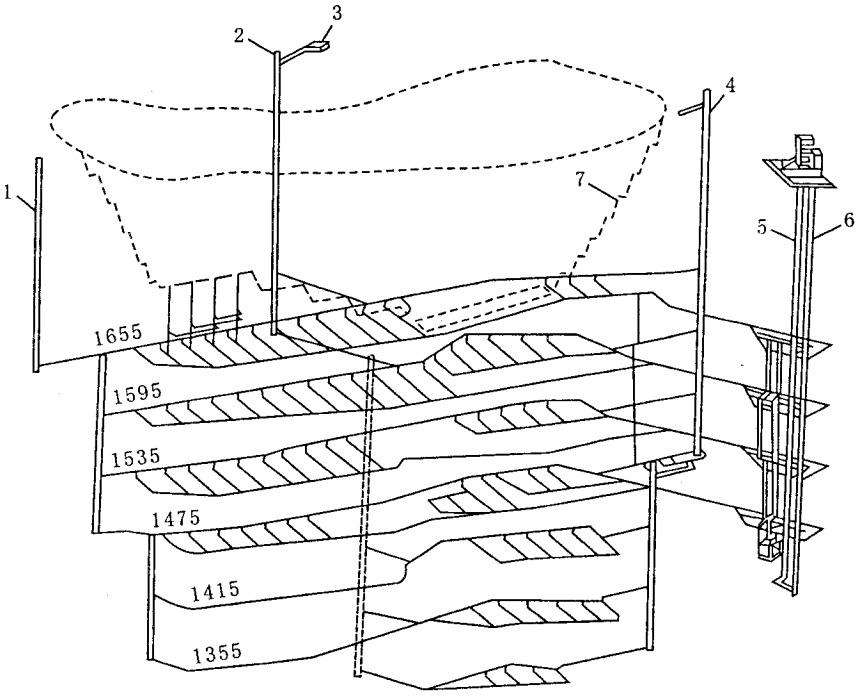


图 6-2　白银厂露天转地下独立开拓系统

1—西风井;2—北风井;3—扇风机房;4—东风井;5—主井;6—副井;7—露天矿

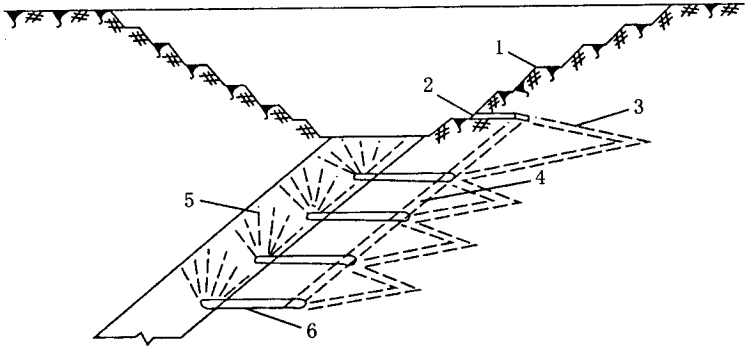


图 6-3　局部联合开拓系统

1—露天边帮;2—平硐;3—斜坡道;4—溜井;5—深孔;6—装矿横巷

(3)露天与地下联合开拓系统

①露天坑内外联合开拓。在露天坑较低的台阶有足够空间的情况下，可以在坑内布置斜坡道或风井等辅助井巷，而把主井和主要运输巷道布置在坑外，如我国的凤凰山铁矿（图 6－4）和瑞典的 Kiruna 铁矿。优点是可以减少开拓量，达到提前见矿，保持矿石产量稳定。

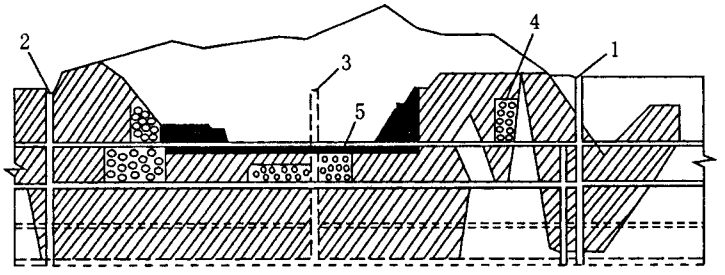


图 6－4　凤凰山铁矿露天坑内外联合开拓系统

1—主井；2—副井；3—风井；4—矿房；5—境界顶柱

②共用地下井巷运输的联合开拓。露天和地下开采的矿石都从地下井巷运出。如图 6－5 所示，露天采用斜井和石门开拓，地下采用盲竖井开拓。露天采下的矿石用汽车经石门运到斜井，用斜井的箕斗运到地面，运输线路的长度比用汽车运输缩短了一半，降低了运输费用。这种方案的优点是：露天矿开拓运输系统简单、线路短，在露天开采深度大于 100～150m 时，利用石门斜井开拓可使运距缩短 50%～60%，大大降低了运输费用；可加大露天矿最终边坡角，减少剥离量和基建投资；可利用地下巷道排水和疏干矿床，改善露天矿的生产条件；可缩短露天转地下开采的过渡期，能较快达到地采的设计生产能力。

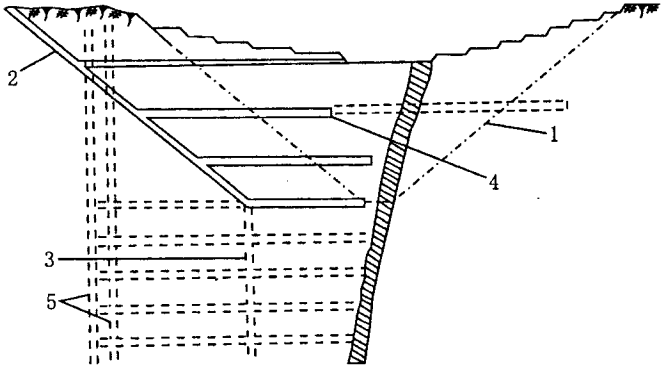


图 6－5　共用地下井巷运输的联合开拓

1—露天最终边界；2—斜井；3—盲竖井；4—石门；5—竖井

在确定开拓巷道的类型、形状、规格与具体位置时，应使其具有多种用途，避免受露天生产爆破的影响。一般药量小于 10t 时，距爆源的地震安全距离为 100m。

当露天矿采用地下运输的联合开拓系统时，在露天坑内设立破碎站，以减小矿岩块度，从而有效地控制井巷断面尺寸。$4m^3$ 斗容电铲装载矿岩的最大块度为 1.0～1.2m，而目前国产坑内用矿车的容许矿岩块度一般小于 0.7m，竖井翻转式箕斗和底卸式箕斗的容许块度分别小于 0.35m 和 0.25m，斜井箕斗容许块度小于 0.65m，斜井胶带运输机块度控制在 0.25～0.3m 以内。

二、露天与地下开采的相互影响

（1）露天开采对地下开采的影响

露天开采对地下开采的影响集中表现在要求地下第一阶段矿块的采矿方法及其结构有利于安全生产。

当地下开采选用空场采矿法时，露天和地下开采可以在一个垂直面内同时作业，但要求在露天坑底部到地下采场顶部之间保留一定厚度的隔离顶柱。同时，对地下采场的暴露面积、间柱的强度、露天与地下爆破的规模等均须严格要求与控制。当地下开采选用崩落采矿法时，要求采区上部有一个安全缓冲垫层。

（2）地下开采对露天开采的影响

露天矿受地下开采影响的范围与程度，与露天和地下在时间、空间上的结合程度，以及地下采空区的状况等因素有关。如果露天的穿爆和装运工作是在未充填的空场法采空区的上方作业，确定露天与地下之间隔离顶柱的合理厚度就非常重要。

为了保证作业安全而采取的综合措施，可能导致露天开采强度的下降，特别是在地下开采移动区内进行露天开采时，可能会严重影响矿山的技术经济指标。

若地下采空区的面积较大，围岩不够稳固或空区形成的时间较长，可能因岩层移动而在地面形成塌陷坑，呈漏斗形状，直径可达几米到几百米，深度为几米至几十米，漏斗壁倾角通常为 85°～105°。根据形成速度的不同，可分为崩塌型塌陷坑和岩移型塌陷坑。前者往往是在地表出现较大的变形以前，突然崩塌形成直壁塌陷坑。影响其形成的主要因素是岩石的物理力学性质、开采深度、矿体厚度、采空区的尺寸与形状、岩层的地质条件等，它多在开采深度不大的矿体回收顶柱和间柱时形成。岩移型塌陷坑形成的速度缓慢，通常是在开采急倾斜矿体时，崩落带向上发展而形成的。影响其形成的主要因素是矿体倾角、矿体厚度，岩石的自然安息角、岩层的产状及其非均质性和各向异性，回采顺序、采空区位置及其上方崩落岩石的高度，顶柱和间柱的稳定性等。它的形成地点较难

准确预测。

统计资料表明,在平均采深与回采垂直高度之比不大于 15 时,就可能形成塌陷坑。崩落型塌陷坑的形成与发展可能给生产带来灾难性的影响。

在地下开采影响区内进行露天开采,应采取以下必要的技术组织措施:

①设计时应采取的措施

应确定观测岩体变形的方法,确定地下采空区的位置与大小的方法,建立专门的机构或确定专人进行地压观测和安全检查。

②生产中保证露天安全作业的主要措施

a)加强地质与测量工作。根据钻孔岩心和岩样试验,以及对岩体的调查与试验,进行岩体工程地质研究;编制露天和地下所有巷道、崩落区边界线、开采区段的地质构造特征、开采状况等测量资料,进行边坡和地下岩层的位移观测;通过钻孔的观测,确定采空区充填程度,并预测地下空洞的发展,查出可能突然发生崩落危险的区段等。

b)空洞处理与边坡整治。根据观测资料与预测,进行空洞处理设计,对露天安全生产有威胁的空洞应尽快消除;通常采用深孔微差爆破法或充填法处理空洞;进行边坡整治的局部设计并予以实施;全面检查露天作业的安全条件。

c)降低爆破震动。编制合理的爆破作业图表,采取减震爆破技术措施,降低爆破地震波对露天矿底部的破坏作用。

d)露天凿岩爆破的安全措施。在编制地下开采影响区内的凿岩爆破设计时,必须在综合平面图、剖面图和垂直投影图上标出采空区的边界线、矿房顶底板的标高、井巷的位置、崩落区的边界线等;确定已采矿房顶板实际位置的主要方法是岩心钻探法。

当需要从露天坑底向护顶柱钻凿垂直爆破深孔时,护顶柱安全厚度的经验数据如下:当矿房跨度在 10m 以内时,护顶柱厚度不应小于矿房跨度的 2 倍;当矿房跨度大于 10m 时,原则上不应小于 2.5 ~ 3 倍;在顶柱上进行生产凿岩前,应先确定顶柱的稳定状况;当护顶柱没有达到安全厚度或稳定性不好时,必须停止常规的凿岩爆破和铲装工作,改用轻型钻机在用锚杆固定的平台上凿岩,钻工必须系安全绳。

③岩层移动区内的露天运输。地下开采可能引起露天轨道路基下沉,出现拉伸或挤压变形,导致钢轨位移和轨道接头间隙发生变化,使线路的直线度受到破坏。铁路线路通常对纵向挤压变形的影响最敏感,地面坡度变化的影响次之。顿巴斯煤田通过观测结果确定铁路安全运行的地表变形最大值为:总下沉量 1000 ~ 1500mm,下沉速度 7 ~ 12mm/d,水平应变(5 ~ 6)$\times 10^{-3}$ mm/m,倾斜应变(7 ~ 8)$\times 10^{-3}$ mm/m。

对固定线路和临时线路除按安全技术操作规程进行检查外,还要进行线路的水准测

量,观测地表移动情况。根据变形情况及时进行维修,包括路基的修复和把钢轨的间隙调整到规定值等。

三、过渡期地下回采方案及过渡期限

(1)过渡期地下回采方案

这是指在露天转地下开采的过渡期间,地下开采第一阶段与露天坑底之间矿体的回采方案。

①留境界顶柱的分段留矿法方案

用分段留矿法在境界顶柱以下回采矿体时,应该在露天开采结束后进行。凤凰山铁矿的应用实例见图 6-6。在露天坑底保留 7~12m 厚的境界顶柱 13。顶柱以下的矿体划分为矿房和矿柱,用深孔留矿法回采矿房并暂留矿柱。在矿房回采过程中,放出 30%左右的崩落矿石。露天采矿作业结束后,用潜孔钻机从露天坑底向下凿岩,爆破境界顶柱,同时崩落一定数量的顶盘围岩形成覆盖层,在覆盖层下放出顶柱矿石和采场所有存留的矿石,下部矿体则用阶段崩落法回采。

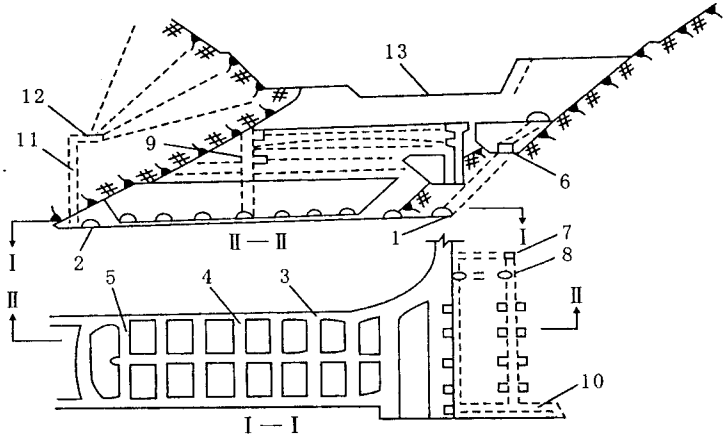


图 6-6　凤凰山铁矿留境界顶柱的分段留矿法方案

1—脉外运输平巷;2—脉内运输平巷;3—运输横巷;4—装矿巷道;
5—切割平巷;6—电耙道;7—人行天井;8—溜矿井;9—凿岩天井;10—回风道;
11—放顶天井;12—放顶凿岩硐室;13—境界顶柱

境界顶柱的安全厚度可用多种理论方法和数值方法计算。由于影响采场地压的因素很多且极为复杂,因此,理论计算的结果一般仅供设计参考。在实践中,多数矿山仍参照类似矿山经验选取。顶柱厚度视矿岩的稳固性而异。矿岩稳固时,厚度一般为 10m 左

右,有的矿山按回采矿房跨度的一半取值。俄罗斯学者认为当矿岩的普氏系数为 5 ~ 12 时,境界顶柱的厚度必须等于或大于矿房的跨度,实际的顶柱厚度为 10 ~ 30m。境界顶柱的稳定性随采空区存在时间的增加及其面积的扩大而削弱,因此,缩短回采周期、减小采空区暴露面积,对增强境界顶柱的稳定性是十分重要的。

②不留境界顶柱的分段空场法方案

金岭铁矿的应用实例(图 6 - 7)为不设境界顶柱,将分段空场法最上一个分段的高度适当加大,当露天采矿结束后,分区逐段回采第一分段。待矿房回采结束,在回收矿柱的同时,爆破一定数量的上盘围岩充填采空区,其余采空区的处理依赖上盘围岩的自然崩落。一般情况下,矿柱放矿 1 ~ 2 个月后,顶盘岩石逐渐冒落形成覆盖层,下部矿体采用崩落法回采。

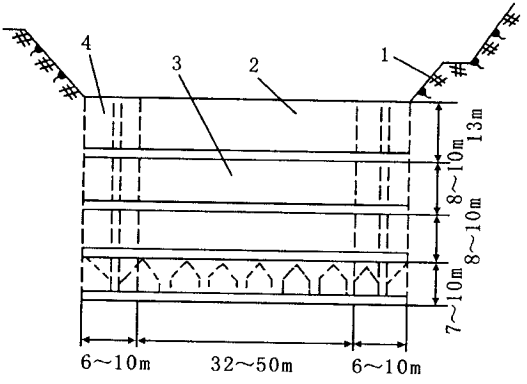


图 6 - 7　金岭铁矿不留境界顶柱的分段空场法方案
1—露天矿;2—空场法最上分段;3—矿房;4—矿柱

③梯段空场法方案

本方案成功地应用于南非科菲丰坦金刚石矿。矿体接近垂直,管状产出,岩管近似椭圆形,露天开采深度为 240m,下部转为地下开采。从露天坑底向下每隔 30m 划分生产分段,在每个分段水平上,围绕岩管的边缘在围岩中开掘环形运输巷道(图 6 - 8)。从环形运输巷道向岩管开掘相互平行的凿岩巷道,其中心距为 12 ~ 18m,在岩管中央开掘一条与凿岩巷道垂直的、宽 8 ~ 10m 的切割槽通达地表,形成分段扇形深孔崩矿的自由面和补偿空间。各分段可以同时作业,但是上部分段需比下部分段超前回采 6 ~ 8m(图 6 - 9),形成梯段状。崩下的矿石部分用铲运机从分段凿岩巷道装运至矿石溜井,下放到主要运输水平,其余矿石从最下一个分段的漏斗放出,矿石回收率可达 95% 以上。采区通风主要是保证格筛水平和电耙作业的通风条件。这些作业地点均有独立的回风巷道与脉外通风道联通。凿岩巷道的末端与采空区相通,可借助自然风流通风。这种方法工艺

简单,投产快,劳动生产率和矿石回收率高,通风与安全生产条件好,但当两帮围岩控制不好时,易混入废石,且由于凿岩巷道与露天相通,易受地面气候和雨水影响。

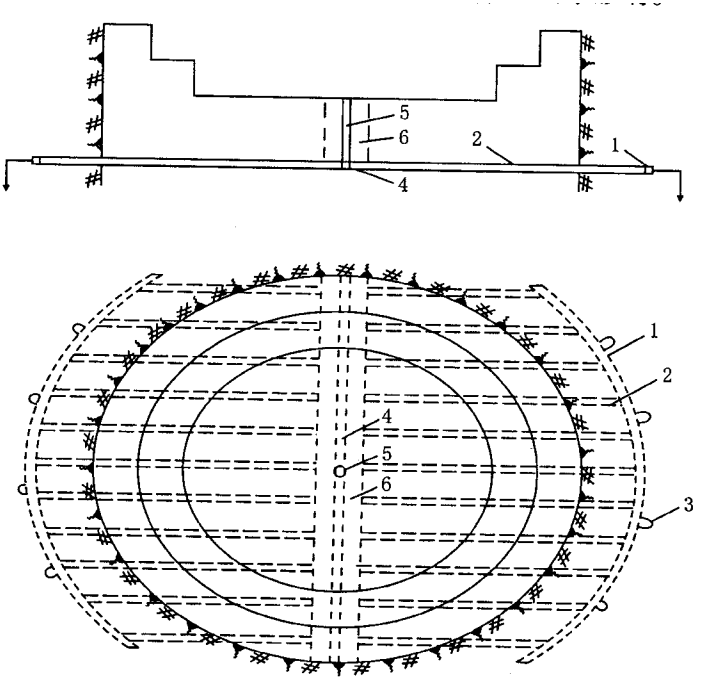


图 6－8　梯段空场法采准切割巷道布置

1—环形运输巷道;2—凿岩巷道;3—矿石溜井;4—切割平巷;5—切割天井;6—切割槽

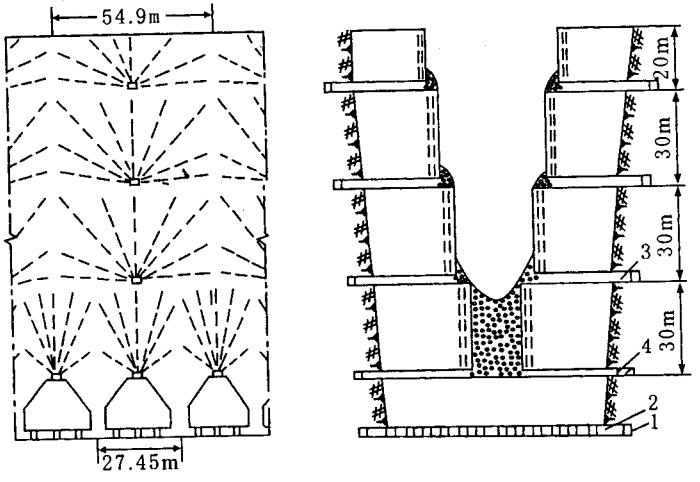


图 6－9　梯段空场采矿法

1—运输巷道;2—格筛巷道;3—分段凿岩巷道;4—拉底巷道

④球形药包垂直漏斗后退式采矿法方案

在澳大利亚 Arldcthan 矿和我国铜绿山铜铁矿露天转地下过渡期开采中应用了这种方案。它具有采准工程量小,效率高,成本低,安全可靠的特点。

⑤充填采矿法方案

这种方案的矿房回采工艺与留境界顶柱的分段空场法方案基本相同,不同之处是矿房回采以后,用废石或胶结材料充填采空区。

a)胶结充填法方案。加拿大 KiddCreek 多金属矿在过渡期间留安全矿柱支撑露天坑底的顶柱。矿房长 30m,宽 15m,高 60 ~ 90m,间柱宽 15 ~ 45m,露天坑底的顶柱厚 9m。矿房采用分段采矿法回采,胶结充填(图 6 - 10)。此方案用于开采价值较高的矿体。优点:地下与露天可较长时间同时开采,生产相对安全;境界顶柱可阻止地表水灌入地下,并可减小地下采区的漏风系数;境界顶柱矿石回收率高、贫化率低。缺点:回采充填工艺复杂,生产成本较高。

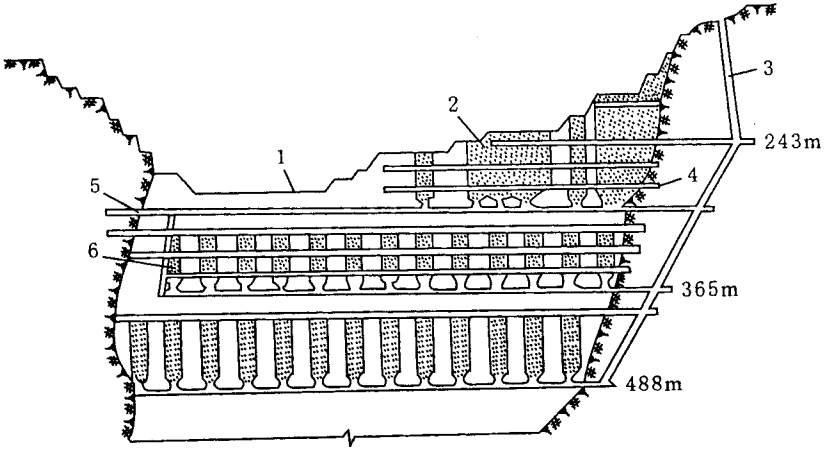


图 6 - 10　分段胶结充填法

1—露天坑底;2—露天边坡下的矿房;3—通风天井;4—分段平巷;
5—运输出矿巷道;6—露天坑底的矿房

b)废石充填法方案。与上述方案不同的是充填料由胶结材料改为废石或尾砂。它用于开采面积不大且价值不高的矿体,矿柱矿量不大或不再回采矿柱的矿山,如芬兰 Pyhasalmi 铜锌矿。它的工艺简单,成本较低,但矿石的贫化与损失较大。

⑥崩落采矿法方案

a)分段崩落法方案。俄罗斯列别金矿床为含铁石英岩,探明储量 55×10^8 t,设想沿垂直方向划分为三个工艺段进行开采(图 6 - 11):－120m 水平以上为露天开采;－120m ~ －

500m 用分段崩落法开采，在露天坑底钻凿下向深孔，并在分段凿岩巷道内钻凿上向和下向深孔，进行分段挤压崩矿，矿石从下部集矿水平的漏斗中放出，所形成的采空区可排放大量的剥离废石与选矿尾砂；－500m 以下可用阶段矿房法或阶段强制崩落法开采。

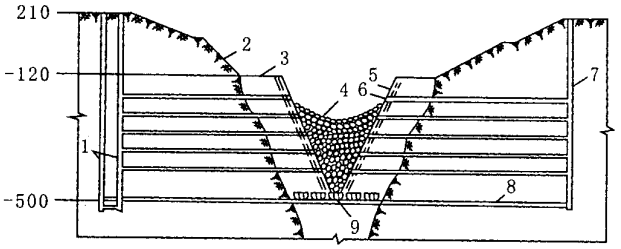


图 6－11　分段崩落法

1—提升井；2—露天开采最终境界；3—露天坑底；4—崩落矿石；5—爆破深孔；6—分段凿岩巷道；7—通风井；8—集中出矿水平；9—放矿漏斗

b)回采前形成覆盖层的分段崩落法方案。不留境界顶柱，露天开采结束后，以整个矿块作为回采单元，用分段崩落法进行连续回采。为了满足安全生产和挤压爆破的需要，应在分段崩落法回采前形成一定厚度的岩石覆盖缓冲层，其厚度一般小于 15～20m，如余华寺铁矿（图 6－12）。多数矿山利用露天剥离废石形成覆盖层。这种方案的优点是生产能力大，回采效率高，成本低，生产安全。缺点是当同一矿区中无其他矿段可以调节产量时，在形成覆盖层时期，可能因停止回采而导致矿山减产，且渗水和漏风较大。

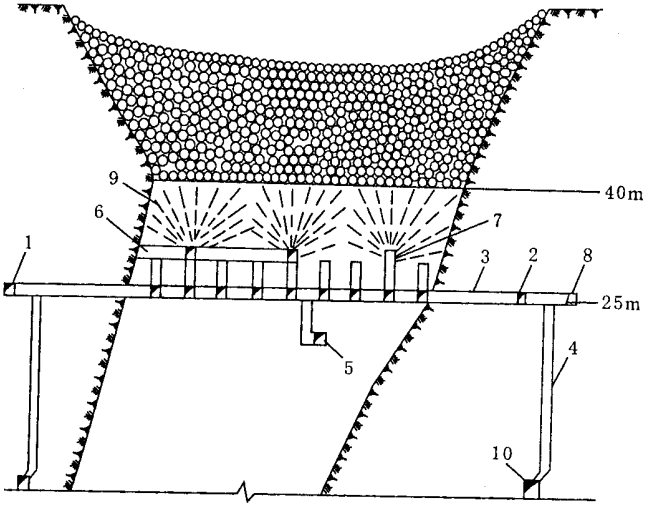


图 6－12　余华寺铁矿分段崩落法

1—上盘联络道；2—下盘联络道；3—分段电耙道；4—溜矿井；5—回风小井；6—拉底巷道；7—凿岩巷道；8—电耙硐室；9—炮孔；10—运输平巷

c)回采过程中形成覆盖层的阶段强制崩落法方案。回采从矿体的一端向另一端推进。在第一阶段沿矿体走向回采 60～70m 以后,在矿块出矿的末期,在拉底水平以上留 6～7m 厚的崩落矿石作为爆破缓冲层,用硐室爆破崩落采空区顶盘围岩形成覆盖层(图 6－13)。此方案的优点是露天与地下可以同时作业。缺点是放矿控制困难,矿石贫化率高。

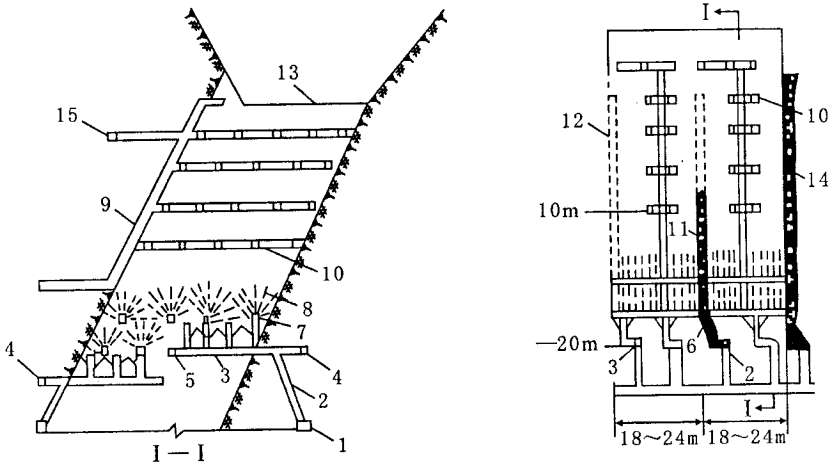


图 6－13　松树卯矿阶段强制崩落法

1—运输平巷;2—矿石溜井;3—电耙道;4—进风巷道;5—回风巷道;
6—放矿漏斗;7—拉底巷道;8—扇形炮孔;9—联络井;10—药室;11—切割矿石;
12—切割槽;13—露天坑底;14—松动矿石;15—放顶硐室

d)充填废石形成覆盖层的阶段强制崩落法方案。本方案适用于矿岩稳固的厚大矿体。先在矿床的一翼用露天方法开采至设计的露采终了深度,继续沿走向朝矿体的另一翼水平推进 150～200m 以后(图 6－14),在紧靠非工作帮端部的矿体中掘进一条切割天井,该天井把地下放矿漏斗与露天坑底联通,并以切割天井为自由面,垂直于矿体凿岩爆破,形成回采露天境界底柱的切割立槽,在露天境界底柱的全高上用露天设备凿岩,随着露天开采工作线的推进而逐步实施露天境界底柱的爆破,崩落矿石经井下巷道运至地表。露天境界底柱以下各水平的矿体则用阶段强制崩落法或阶段矿房法回采。由露天开采、境界矿柱开采和地下开采所形成的采空区可作为内部排土场,用排入的废石支撑边帮的压力,有助于提高边帮的稳定性。乌克兰克里沃罗格矿区安诺夫斯克含铁石英岩矿床长度在 7km 以上,矿体倾角 55°～85°,厚度 92～340m,埋藏深度 300～450m,露天采场深度为 200m,露天境界底柱高 75m,台阶坡面角和边坡角为 75°～80°,境界矿柱矿量

2100×10^4t，年开采量为 200×10^4t，内部排土场堆置 4.1×10^8m^3 剥离废石，不但减少了废石运输费用，还减少外部排土场面积 2.48km^2。

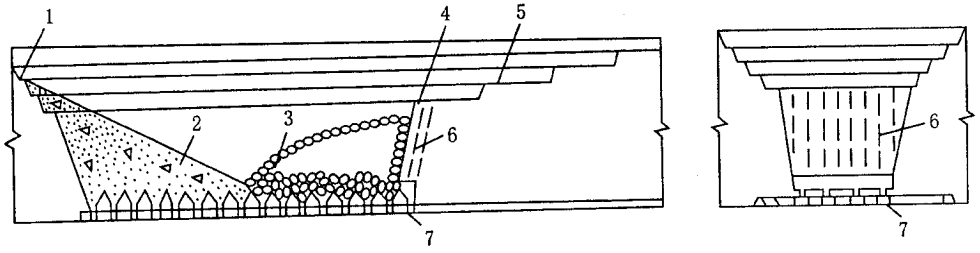


图 6－14　充填废石形成覆盖层的阶段强制崩落法方案

1—露天矿非工作帮；2—内部排土场；3—采下矿石；
4—境界矿柱、回采台阶；5—露天矿工作帮；6—下向平行炮孔；7—放矿巷道

（2）露天转地下开采的过渡期限

为了保证矿山能持续稳产过渡，应及时设计与编制过渡方案，确定合理的建设期限。

①设计编制过渡方案

矿床开采总体设计若已确定为露天转地下开采，应对整个矿床开采的全过程进行统筹规划，具体的过渡开采设计则往往是在露天开采的中后期进行。露天开采 10 年以内的矿山，从露天矿建设开始就应及时研究问地卜开采的过渡。

对于走向长度大或多区开采的露天矿，可采取分区、分期的过渡方案，避免露天与地下同时开采作业的干扰。例如杨家杖子矿务局松树卯矿，矿体走向长 2000m，划为南北两个露天采场，日生产能力 2000t，采取先北露天后南露天分期向地下开采过渡。

②露天转地下过渡期限的确定

地下建设的总时间按下式确定：

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \tag{6-1}$$

式中　T、t_1、t_2、t_3、t_4——分别为总时间、基建准备时间、地面公共工程建设时间、井筒掘进时间、水平巷道掘进时间。

式中不包括采矿方法试验和地下投产至达产时间。上述过渡期应满足三级矿量保有期限的要求。

利用露天矿的地下排水井巷作为地下矿的采准切割巷道可以缩短地下矿的建设时间。当基建准备与地面公共工程建设平行作业，井筒掘进与水平巷道掘进平行作业时，地下建设的总时间可表示为：

$$T = t_1 + t_3 \tag{6-2}$$

目前国内外露天转地下开采的过渡期限一般为 7 ~ 12 年。

四、露天矿无剥离开采与残留矿体开采

(1)露天矿无剥离开采

露天矿开采到设计最终水平后,为了充分发挥露天矿生产设备和辅助设施的潜力,并改善露天转地下过渡期的产量衔接,多数矿山都要进行无剥离下延开采。

对于倾斜或急倾斜矿体,通常在上盘边坡下留三角矿柱以支撑上盘边帮,即可实现无剥离延深开采(图 6 - 15)。延深开采深度取决于露天坑底允许的最小宽度、三角矿柱的损失量和上盘边坡的稳定性等。

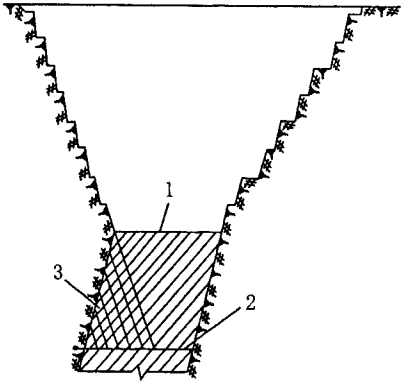


图 6 - 15　露天矿无剥离延伸开采

1—设计最终水平界线;2—无剥离延深水平界线;3—三角矿柱

露天坑底允许的最小宽度根据露天境界确定的原则通过计算确定。汽车运输允许的最小底宽一般为 18 ~ 24m。

为了尽可能多地采出矿量,采矿台阶不再设置矿石安全平台,或在露天开采结束之前取消矿石安全平台。因此,无剥离延深开采的边坡通常很陡,甚至是垂直的,在大冶铁矿东露天坑底的部分边坡就能见到这种情况。

近年国外露天矿按照经济合理性确定的无剥离延深开采深度为 30 ~ 50m,而我国矿山一般延深 20m,偏小。

(2)露天矿残留矿体的回采

露天开采至底部边界时,矿体两端和边坡挂帮矿量一般可占其总储量的 5% ~ 16%,它们的回采具有经济价值。由于挂帮矿量埋藏高差可能较大,矿量较少,回采强度较低,安全条件较差,应强化开采,以免牵制地下开采主矿体的下降速度,降低过渡期的矿石产

量,影响达产时间。

①露天矿边坡残留矿体的回采

由于受到各种外力的破坏且形状不规则,露天矿边坡残留矿体的回采比较困难。对于露天矿挂帮矿体,可先用露天方法直接从非工作帮开采靠外的矿体,然后用地下方法开采靠内的矿体。当挂帮矿体延伸较长时,通常用地下法开采。

a)充填法回采边坡矿体。当露天坑境界矿柱用充填法回采时,露天矿非工作帮的挂帮矿体通常也采用充填法回采。利用露采剥离废石和尾砂充填采空区,有利于保持边坡稳定,金川龙首矿应用此法。

b)崩落法回采边坡矿体。当露天坑底矿柱和地下第一阶段选用崩落法回采时,边坡挂帮矿体也用崩落法回采。此时,地下的回采顺序应向边坡后退进行,使边坡附近的塌落漏斗逐渐发展,形成比较平缓的崩落区,使露天矿下部台阶免受滚石的威胁。在定期进行岩移观测并采取相应措施的情况下,对露天矿的安全生产影响很小。如加拿大的Craigmont镍矿和我国冶山铁矿、海城滑石矿等采用了这种方法。武汉理工大学在大冶铁矿的研究表明,用无底柱分段崩落法开采挂帮矿体,如果能用废石把原有的露天采坑充填,则可使挂帮矿体从原有临空的二维受力状态变为侧向受充填废石挤压的三维受力状态,并且在挂帮矿体的开采过程中,边坡内采场生产爆破产生的地震波传递到边坡岩石与充填废石的接触面时,一部分地震波可穿透接触面进入露天采坑内的充填废石内,被废石所吸收,避免过多的地震波从接触面反射回去,形成对边坡岩体的拉应力。上述两种作用都改变了边坡岩体通常所处的不利的受力状态,有利于保持边坡岩体在挂帮矿体开采过程中的采场稳定性。

c)空矿房法回采边坡矿体。当露天矿边缘有重要建筑物使露天边坡不能进一步扩帮时,可从边坡下开掘运输平硐到矿岩接触面(图6-16),然后从平硐开掘斜溜井,其最小倾角为45°~52°。布置在边坡上部的矿房底部是倾斜的,下部矿房的底部是水平的。在矿房底部开掘放矿漏斗,并拉底形成爆破的补偿空间。在露天平台上用露天钻机向下钻孔,孔深30~100m,崩落矿石经斜溜井下放或从漏斗放出,通过平硐运出。矿房采完后用废石充填。

d)露天间隔回采边坡矿体。在露天矿非工作帮为矿体的情况下,可以用露天方法开采100~200m长的区段,在两个区段之间留20~40m宽的矿柱(图6-17)。各台阶的深孔均钻至露天底标高。区段爆破出矿后即用剥离废石充填。边坡开采高度可达50~85m。可省去开采这部分矿石的剥离费,作业安全。

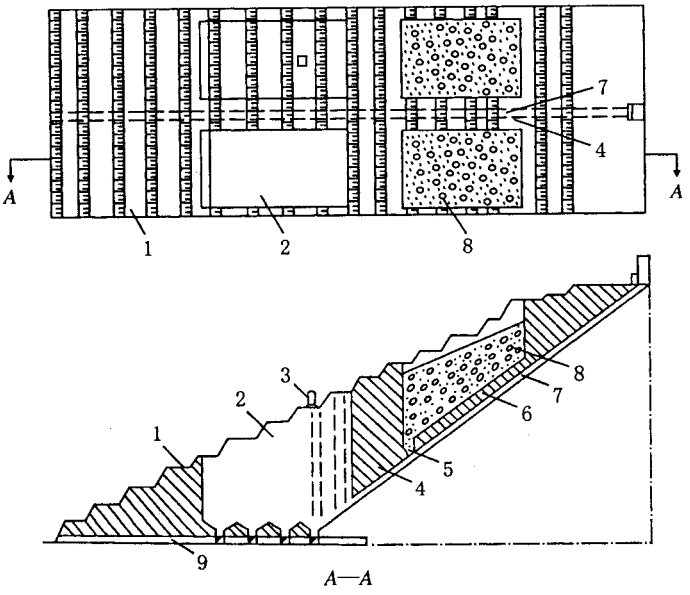


图 6－16　空矿房法回采边坡矿体

1—露天台阶；2—空矿房；3—露天钻机；4—矿房间柱；
5—放矿漏斗；6—倾斜底部；7—矿石溜井；8—充填体；9—运输平硐

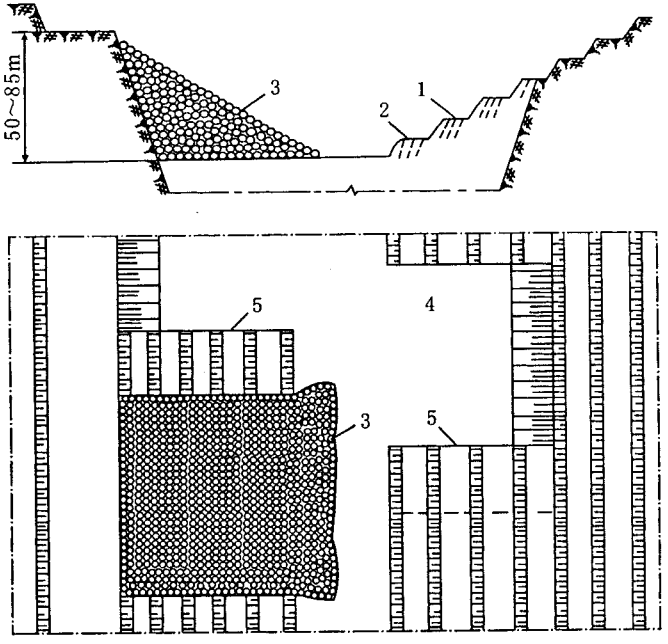


图 6－17　露天间隔回采边坡矿体

1—露天非工作帮；2—深孔；3—充填废石；4—采空区；5—矿柱

e)露天矿房法。当矿体允许大面积暴露时,在露天矿非工作帮可能形成高 60 ~ 140m、宽 20 ~ 45m 的空矿房(图 6 - 18),可以使用露天穿孔和运输设备进行开采。

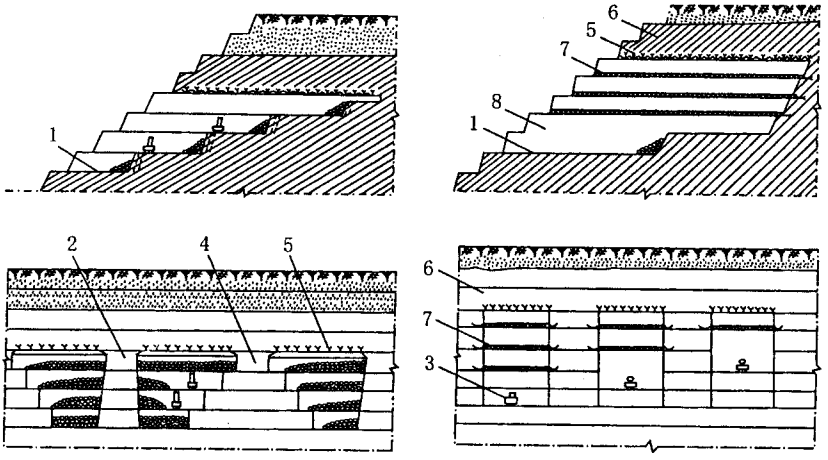


图 6 - 18　露天矿房法

1—露天台阶;2—房间矿柱;3—露天挖掘机;4—具有侧面运输平台的矿柱;
5—锚杆金属网;6—顶柱;7—保护网;8—空矿房

②露天矿残留三角矿柱的回采

无剥离延深开采一般会在顶、底盘下面和端帮留下三角矿柱。由于露天矿端帮的曲率半径较小,稳定性较好,容易回采,通常可以直接从露天采出这部分残留三角矿柱。对于倾角不陡的厚矿体,在矿岩不稳固的情况下,由于上盘三角矿柱面积大,矿柱回采困难,回采部分矿柱就可能引起上盘岩石大量移动,矿柱回收率低,作业安全条件差,是露天转地下的薄弱环节,应当提前单独回采这部分矿柱,或与地下第一阶段的矿体一起回采。在矿岩稳固的条件下,可用留矿法或空场法回采三角矿柱,然后用废石充填。矿岩不稳固时则用充填法回采。在三角矿柱回采以前,如果露天坑底堆积的废石已将三角矿柱表面覆盖,则回采三角矿柱时一般可在靠边坡一侧留 2 ~ 3m 宽的隔离矿柱。

第三节　露天与地下同时联合开采

一、概述

露天与地下同时联合开采是指矿山从开始生产并在以后相当长的时期内，采用露天与地下方法联合进行开采。它的优点是：能最大限度地强化矿床开采；露天与地下的开拓基建工程能相互结合，减少投资和生产费用；投产与达产的时间短；有利于露天矿的废石排放和环境保护。缺点是：由于在露天边坡下面进行地下开采并形成采空区，降低了边坡岩体的稳定性；由于地下采矿使露天矿岩体内产生裂缝，给露天凿岩爆破工作带来困难，降低了露天生产效率；为了防止露天重型设备陷落到地下采空区内，使地下生产和露天的采矿工作复杂化；地下采用崩落采矿法时，应随时用废石充填采空区，以保证露天工作的安全；在露天坑底保留大量保安矿柱或采用胶结充填，增加了矿石损失和采矿成本，降低了技术经济指标。

从矿山设计开始就要研究露天与地下同时开采的相互影响及其配合协调关系，研究总的矿山能力及其平衡，确定露天与地下开采的最优境界，研究露天与地下的开拓运输系统和可能的联合开拓方案，全面综合研究通风、排水、公共设施和安全等问题。

同时联合开采适用于矿体延深大、储量大、深部含有富矿体或急需矿种的矿山。当矿体走向长度不大时，通常在垂直方向上进行露天与地下同时开采；当矿体走向长度大时，多采用水平方向上的露天与地下同时开采。

同时联合开采中的许多技术和安全问题与露天转地下开采是相同的。

二、露天与地下同时联合开采的开拓方案

由于露天与地下开采均有较长的服务年限，露天的开采深度较大且与地下矿山向时建设，因此，生产初期均采用独立的开拓运输系统。

地下井巷工程建在露天坑之外，其出口往往与露天坑的地面运输相结合。在露天开采向深部发展后，两个开拓运输系统就有可能相结合，可显著降低深凹露天矿的矿岩运距与费用。因此，在同时联合开采的开拓设计中，要研究露天地面开拓系统转为与地下工程联合开拓的问题，进行减少边坡剥离量与增加地下井巷工程量的计算比较，进行不

同运输系统方案的能力和运输费用的比较,研究由露天运输转为露天地下联合开拓运输的最优深度等,根据各矿的特点和技术水平通过技术经济比较后确定方案。

三、同时联合开采的地下采矿方法

由于在地下开采所形成的岩石移动带的上部长期同时进行露天开采作业,为了保证露天作业的安全,只允许缓倾斜矿体在留设境界顶柱后,用房柱法或充填法回采。对倾斜和急倾斜矿体,只能用充填法回采。矿岩稳固时,采用空场法嗣后充填,井下开采应从下向上进行。矿岩中等稳固时,可采用分段充填法或上向水平分层充填法。矿岩均不稳固时,采用下向胶结充填法。如果不采用胶结充填而用废石或尾砂充填,就要保留大量矿柱,要等到露天开采结束后才能回采这些矿柱。地下长期用空场法或不充填的崩落法开采,可能会给上方的露天生产造成危害。

(1)嗣后废石充填的阶段矿房法

前苏联夏依斯基多金属矿品位较高的矿体埋藏在地面以下 170m 深处,如果用露天开采这部分富矿体要比用地下开采晚 11~12 年。由于卫国战争时期国家急需用铜而采用了在露天开采的同时,用地下阶段矿房法开采这部分富矿体,采空区嗣后用废石充填,矿柱留待以后利用露天法采出。

该矿要求留设的境界顶柱厚度不小于 100m。因此,露天开采下降到 70m 深度时,地下开采就需下延或停产,对稳产不利,且由于岩层移动使露天开采的矿石损失与贫化增加,成本上升,同时开采的时间只持续了 10 年。

(2)嗣后胶结充填的阶段矿房法

夏依斯基多金属矿为了克服废石充填岩层移动量较大的问题,试验成功了胶结充填,用它进行了 20 多年的同时联合开采,取得了如下良好效果:境界顶柱的厚度由 100m 下降到 60m,矿床总的生产能力提高 50%,保证了高品位铜矿石的长期均匀生产,矿石回收率高达 95%,贫化率低;提前开采高品位矿石所获的利润为建设投资的近三倍;不另增加投资,解决了露天开采的排水问题;生产作业安全,排除了内因火灾的可能性。

(3)下向胶结充填法

适用于构造发育,矿体与围岩均不稳固的富矿体的开采。如前苏联的若茨克多金属矿,露天与地下同时联合开采的境界顶柱厚 100~125m,该部分矿石待露天结束后再用地下法开采。地下先后采用留矿法、分段空场法、上向水平分层法开采,因作业不安全(即使 10~12m^2 的断面也到处发生冒顶和塌落),矿石结块而不能放矿,贫化损失大等原因而失败,改用下向胶结充填法获得成功。

（4）分段崩落法

在露采与地采之间留出足够的底部隔离矿柱，开凿废石溜井后，就可在露天开采的同时，在隔离矿柱下，自上而下地进行分段崩落法开采。随着崩落矿石的放出，陆续把露天剥离的废石倒入溜井，以充填地下采空区，起到部分支撑围岩的作用（图 6－19）。

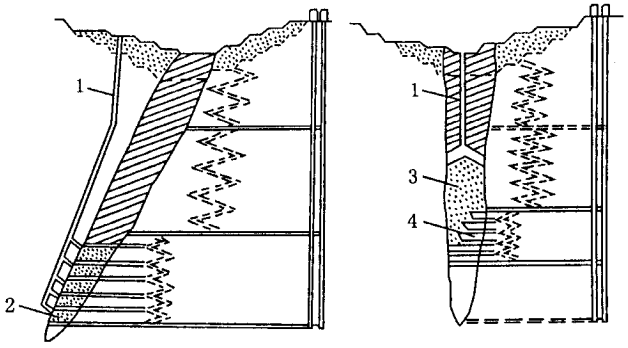


图 6－19　地下用分段崩落法进行同时联合开采

1—废石溜井；2—废石充填矿房；3—充填废石；4—分段崩落法采场

第四节　地下转露天开采

一、地下转露天开采的适用情况

地下转露天开采主要适用于以下几种特殊情况：①地下开采矿石损失较大，转为露天开采以减少矿量损失；②由于地表黄泥滑落，泥水下灌，威胁地下生产人员的安全，或是由于矿石含硫量过高，易发生内生火灾等安全技术上不适于地下开采的矿山；③继续用地采不能满足产量要求，经济效益不佳；④投产前地质勘探的程度不够，或由于设计失误而进行了地下开采，随着勘探程度的提高，实践表明更适合露天开采的矿山；⑤随着露采技术的发展和装备水平的提高，从地下开采转为露天开采具有更好的经济效益；⑥有时用于回收地下开采留下的矿柱。

二、地下转露天开采的开拓方案

地下转露天开采的过渡阶段，一般采用分期或分区建设。地下生产对露天矿建设的

影响较小,因此它们的过渡对生产衔接没有重大影响。

当采用溜井下放露天开采的矿石时,要注意把溜井设置在已采区的岩移带范围之外,下放矿石的运输方案需要认真研究。

前苏联的高地矿和穆库兰斯基矿,以及我国的铜官山铜矿和铜山铜矿都采用了露天与地下联合开拓方案。

三、地下转露天开采的地下采矿方法

海城滑石矿 1 号矿体厚 35 ~ 150m,长 300 多米,倾角 35° ~ 45°,产于白云岩、大理岩含矿带中,矿岩无明显界线。从 110m 水平以上用水平分层充填法回采,分层高度 3m,采高 2m,留 1m 顶柱,以密集支护进路回采,进路长 10m,废石充填,回收率 60% 左右,尚有 40% 左右的滑石未回收。为了回收这部分残矿,由地下转为露天开采。

铜山铜矿前山区原为地下崩落法开采,因矿石含硫高,发火自燃, -40m 以上改用露天开采。

河南某铝矿矿床品位上贫下富,在 20 世纪 80 年代投产,用充填法开采矿床下部富矿,生产规模 3000t/d。但由于地下开采成本高,矿石贫化率高,产量满足不了需要,90 年代遂以露天开采接替地下开采,露天生产规模 5000t/d。

在转为露天开采以前,前苏联的塔尔莱矿和穆库兰斯基矿的地下采矿方法为阶段强制崩落法,日尔雅洛夫斯基矿为分层崩落法和废石充填法,美国的 Morenci 铜矿和 Berkeley 铜矿分别为阶段自然崩落法和空场法。

第七章　矿床二次开采

第一节　二次开采及其原因

在已开采过的矿床或矿床的一部分再进行采矿称为二次开采或重复开采，简称复采。二次开采是增加矿石产量、充分回收矿产资源、提高矿山经济效益和延长矿山企业寿命的重要手段。随着矿石加工和采掘技术的进步以及对矿石需求量的不断增长，有不少矿山一次开采时损失的矿石和留下的贫矿等都具有进行二次开采的价值。

乌克兰克里沃洛格矿区各矿山一次开采后，报损残留的铁矿石达 5 亿吨，通过二次开采获得了良好的经济效益。

我国在计划经济体制时期，由于政治、经济、技术和设备等方面的原因，国有大型煤矿的资源利用率普遍较低，开采后留下数以千万吨计的煤炭资源。丢失大量煤炭资源的原因有：

（1）丢弃顶煤或底煤，如北京木城涧煤矿，直至 1994 年，限于开采技术水平、设备条件和资金等因素，仍采用采顶煤丢底煤的开采方式，只开采 2.0m 高的上分层，丢弃平均高为 2.0m 的下分层。

（2）只采主煤层，丢弃 1m 左右厚的薄煤层。

（3）各种矿柱留煤，如工作面煤柱、采区煤柱、井筒煤柱、断层保护煤柱、地面工业广场与建筑物保护煤柱等留煤。

（4）采优质煤层，丢弃灰分高、发热值低的差质矿段。

(5)因火灾、工程地质灾害等封闭的矿量。

我国在由计划经济向市场经济转轨的过程中,由于在“有水快流”的错误思想指导下,不少矿山企业片面追求眼前利润,采富弃贫,技术水平与管理水平落后,一些乡镇小煤矿的矿石回收率只有10%~15%,一些石膏矿的回收率只有10%左右,损失矿量数以亿吨计,造成了不可再生的宝贵矿产资源的极大浪费。在我们这个矿产资源人均拥有量远低于世界平均水平的国家,不仅令人极为痛心,也带来了非常艰巨的二次开采的研究课题和任务,以实现我国由粗放型的矿产资源开发利用向节约型的矿产资源开发利用转变,走上可持续发展的道路。

我国煤矿已开展了较大范围的二次开采工作,湘西金矿等利用二次开采给国家多回收了大量的矿产资源和增加了矿山企业本身的活力。国外二次开采较多的国家有俄罗斯、乌克兰和加拿大等国。随着社会对各种矿产需求的不断增长和富矿资源的日益减少,二次开采的作用和意义将会越来越大。但是,由于国有大矿废弃的资源多是由个体小矿进行二次开采,技术水平低,设备落后,瓦斯爆炸和火灾事故频发,已引起管理部门和社会的高度关注。

第二节　二次开采的对象及其特点

一、二次开采的矿体类型

根据矿体的赋存状况和一次开采的特点,二次开采的矿体可以分为以下几种类型:

(1)一次开采时损失的矿石,包括一次开采崩落后由于种种原因残留在采空区内未能运出的矿石,以及由于矿体圈定不准,采矿方法及其参数选择不当,凿岩爆破质量不高以及留有各种形式的矿柱等未开采的矿石。

(2)一次开采时认为没有开采价值的表外矿、贫矿、氧化矿与矿化围岩等,随着科学技术的进步,这些矿石现已具有了开采价值。

(3)由于一次开采时技术经济水平较低,当时充填采空区的含矿围岩与尾矿等现已具有了工业利用的价值。

(4)一次开采时采富弃贫留下的贫矿。

(5)采用地下采矿方法对矿床进行一次开采后,用露天方法对残留矿柱和残留矿体

进行二次开采。

（6）采用露天方法开采过的矿床，因技术经济条件的变化，采用露天方法进行二次开采。

二、二次开采的可行性研究应考虑的因素

二次开采前需进行可行性研究和评价。在可行性研究时，除要满足一般的要求外，还应考虑下述诸因素：

（1）一次开采时有关采掘工程的地测资料和有关数据是否完备，是否需要补充勘探。金属矿山一次开采损失的矿石多集中在矿体的下盘，且被压实，可用钻探法探查压实矿石与上覆松散废石的分界面。

（2）二次开采时可能采出的矿石量、允许的贫化率与损失率指标。

（3）采出的矿石能否利用现有的加工工艺，与一次开采的矿石混合处理还是分别处理。

（4）探明矿体分布与老采空区和老巷道工程的相互关系，对老采空区是否会突然冒落、有无积水、有无瓦斯积聚、有无自燃发火的可能等进行预测与探测。

（5）确定二次开采时对一次开采的开拓井巷工程可能利用的程度。

（6）二次开采与一次开采是否有可能同时在上下不同阶段上进行。

（7）二次开采对地表建筑物与构筑物等是否有影响。

三、二次开采开拓工程的特点

要处理好与一次开采时的开拓系统的关系，一方面要满足二次开采本身的各种要求，另一方面要充分利用一次开采已有的开拓工程，以节省二次开采的投资。根据对一次开采的开拓工程的利用程度，二次开采的开拓方法分为下述三种：

（1）利用原有的开拓系统

这种方法只需修复原来的开拓系统，是一种最简单和投资最少的开拓方法。这种开拓方法适用于一次开采已结束的矿山，以及二次开采出矿量不大和一次开采的运输提升能力有富余的矿山。如果二次开采和一次开采的矿石在同一系统不能分别运出，必须混合处理，则只能在选矿技术经济指标降低不明显的矿山才能采用这种开拓方法。

（2）利用一次开采的部分开拓系统和新开掘的部分巷道组成的二次开采开拓系统

这里分两种情况：一种是用原来的提升井提升矿石和新掘进的阶段运输巷道运送矿石；另一种是用原来的阶段巷道运送矿石和新掘进的井筒提升矿石。前一种情况和利用

原有的开拓系统的方法差不多,适用条件也相同,只是原来的阶段运输巷道不能利用,需要重新开掘阶段运输巷道。后一种情况恰好与之相反,无法利用原有提升井,需要重新开掘新提升井,从而允许有较大规模的二次采矿量,并有条件把二次开采的矿石与一次开采的矿石分别运出、分别处理,能增加矿山的生产能力和保证较好的选矿技术经济指标。

(3)新建二次开采的开拓系统

这种方法适用于二次开采产量大、服务年限长及原有的开拓系统不能满足要求的矿山。这种方法有利于把二次开采的贫矿和一次开采的富矿分别运出、分别处理,因而可获得较好的技术经济指标。加拿大的克赖顿矿的二次开采即采用这种开拓方法。

实际工作中,二次开采开拓方法要通过技术经济比较选择,其中二次开采矿石的数量和质量在评价中是决定性的因素。

第三节　二次开采的采矿方法

一、常用的采矿方法

几乎各种采矿方法都可用于二次开采。但是,由于一次开采对矿体和围岩的完整性与稳定性有不同程度的削弱,有的矿床不宜使用空场采矿法。我国矿岩比较稳固的煤矿常采用房柱法开采边角小矿体,如平顶山的乡镇小煤矿。贫矿体与含矿围岩常采用崩落采矿法开采,如乌克兰克里沃罗格矿区各矿。缓倾斜贵重金属薄矿体常用充填采矿法开采,如湘西金矿。充填料矿石与采下残留矿石可用直接放矿法开采,如前苏联阿奇赛铅锌矿。

二、影响二次开采方法选择的因素

二次开采的采矿方法选择,除要满足一次开采时采矿方法选择的要求外,还应考虑以下因素:

(1)二次开采的矿石品位一般都比较低,宜采用成本较低的采矿方法。

(2)二次开采是在一次开采结束的阶段上或矿体中进行,存在不同形状的采空区,矿体和围岩可能发生了变形、移动甚至破坏,整体性差,所以选择的采矿方法应能保证安全

生产。

(3)在矿岩发生移动和破坏的范围内掘进巷道和维护都比较困难,一般宜采用采准、切割工程量较小和回采强度较高的采矿方法。

(4)开采残矿的通风条件往往较差,需考虑加强通风与防止矿石自燃等问题。

总之,要根据二次开采矿体的具体条件,对所有影响因素进行综合的分析和技术经济比较才能确定合理的二次开采方法。

三、采准切割的特点

由于可能受一次采动的影响,二次开采的采矿方法的结构参数与采准布置应根据矿体的具体条件确定。采准与切割工作具有以下特点:

(1)尽可能利用一次开采已有的各种巷道,这些巷道多数需经修复才能利用。

(2)新掘进巷道的布置要注意避免穿过废巷道和采空区,一般是脉外采准。

(3)必须探测原有采空区和矿岩的移动与破坏范围,然后根据探测资料进行采场设计与施工。

(4)采场的运输巷道一般布置在本阶段运输巷道下部,矿石通过溜井放至下一阶段运输巷道运出。

(5)二次开采一般没有一次开采时对三级矿量的严格要求。

四、回采工艺特点

如果是未受一次采动影响和破坏的整体性矿体,其回采工艺和一次开采的回采工艺相同,否则其回采工艺可能有以下特点:

(1)采场中不留底柱,凿岩爆破是在采场运输巷道中进行。

(2)采场中不留矿柱,采用一步骤回采。

(3)采用崩落采矿法时,不设中间凿岩水平,而是在采场下部进行一次落矿,其上部矿石随着放矿的进行而自然崩落。

(4)采下的矿石运至溜井,放到下一阶段运输巷道运出。

(5)开采充填料矿石时,一般无需凿岩爆破落矿,只需少量裸露药包爆破松动,然后出矿。

(6)用崩落法开采时,要严格控制放矿,以保证采出矿石的质量。

五、二次开采的安全要求

二次开采除要严格遵守矿山安全规程外,一般还应满足下述安全要求:

（1）可能要在一次开采结束 5～10 年后才能进行二次开采，以提高崩落矿石的密实性和稳定性。

（2）系统地进行采场地压监测，以便及时对巷道进行维护和更新支护，确保生产作业安全，必要时进行地面沉降观测。

（3）开采崩落带内的矿石时，在巷道中通过钻凿深孔探测矿岩被压实的范围，以便确定安全边界线。

（4）在崩落带内掘进巷道时，炮孔深度不应超过 1～1.3m，而且要采用便于维修更换的可缩性金属支架支护，支架间距不宜大于 0.5m。

（5）当巷道需要通过老巷道或采空区时，应事先用深孔探清边界。邻近采空区时，巷道掘进的每循环进尺不超过 0.5～0.7m，采用加强支护，浇灌混凝上隔墙。

（6）深入调查研究矿床一次开采后的水文地质情况，在老窿区或溶洞附近应采用钻孔探水和放水，防止突水与泥浆涌人事故。乌克兰克里沃罗格矿区捷尔仁斯基矿和巨人矿，以及云南锡业公司老厂锡矿胜利坑等均在二次开采时发生了泥浆涌人事故。

（7）由于在崩落带内掘进天井难度大，安全性差，所以应尽量不用或少用天井，在不得已布置天井时，其高度要控制在 6m 以内。

（8）二次开采时的漏风比较大，通风距离通常比较大，要加强通风系统的管理和加大供风量。

（9）要有严密的防灭火措施，防止地下火灾，以及煤与高硫矿石的自燃。

（10）实施快掘快采是避免围岩过度变形与垮塌，避免出现工程地质事故，减少维护费用的重要措施。

（11）在进行二次开采之前，要采取相应的组织与技术措施，全面分析开采矿体的情况和老工程的状态，拟定相应的安全技术措施，组织强有力的技术队伍承担二次开采的任务。

六、二次开采的研究工作

矿床二次开采可能出现比较复杂的矿山岩石力学问题，国内外都在开展深入的研究。一次开采过程中，在开采区附近岩体的应力变化是以应力释放与下降为主，稍远的岩体会出现应力集中。二次开采通常是在一次开采形成的复杂次生应力场的基础上，继续一次开采的应力变化过程。

俄罗斯热兹卡兹甘矿床为含铜砂岩矿床，用房柱法进行大规模的二次开采，地压的动态表现为：在矿体；采准阶段，掘进单一巷道时，观察到地压的显现强度最大，出现微冲

击、冲击与岩爆;回　工作初期,切割巷道扩帮,形成第一批回采矿房和房间矿柱时,动态地压衰减,显示能量释放的最弱形式——产生大量浮石;回采工作全面发展时期,切顶与爆破房间矿柱使顶板围岩自然崩落,当采空区的跨度达到盘区宽度时,动态压力完全消失。但是,在开采区的下部岩体中形成应力集中,可能导致出现冲击地压。

有限元分析软件 ANSYS 和三维连续体快速拉格朗日分析软件 FLAC3D 已用于二次开采引起的岩体位移、变形与破坏的分析,从而为确定采矿方法、采场参数等提供依据。

物探方法可以初步圈定采空区的范围,确定溶洞的大致位置。

第四节　矿床二次开采实例

一、湘西金矿二次开采实例

(1)地质条件

湘西金矿为一中低温热液生成的缓倾斜薄石英脉状矿床,含金、锑与钨,有层间脉、网状脉和节理脉三种类型矿体,产状与岩层基本一致,平均倾角 26°,具有工业价值的有四条层间脉,平行分布,分段富集。矿体不连续呈板柱状,单条脉厚为 0.1 ~ 2.5m,走向长为 50 ~ 500m,倾斜长为 500 ~ 2000m。各脉水平间距为 10 ~ 100m。矿石的坚固性系数 $f = 8 \sim 12$。顶底板岩石均为紫红色板岩及蚀变板岩,中厚至薄层状,坚固性系数 $f = 4 \sim 8$,断层、层理与节理发育,属中等稳固至不稳固岩层,易沿层理剥落和沿断层节理面垮落。

(2)一次开采情况

过去主要是采用干式充填采矿法开采钨矿,把含金石英网脉围岩采掘下来作为充填料充填采空区。以后这些充填料具有了开采价值,需要进行二次开采。

(3)矿床二次开采

二次开采的矿石有两种,一种为纯充填料矿石,另一种为充填料加顶底盘网脉型矿石,均采用充填采矿法开采。开采纯充填料矿石的方案为倾斜工作面斜壁干式充填法,开采充填料加顶底盘网脉型矿石的方案为分层尾砂胶结充填法。

①斜壁干式充填采矿法

开采的单一充填料矿层的平均厚度为 0.8m，采场内的充填料已被压实，并伴有泥质，经观测顶板岩石已下沉，下沉量为 0.6m，松动层厚度为 4.2～7m。

采场结构参数：阶段高度为 30m，沿走向长度为 25～45m，倾斜长度为 60～70m。不留顶柱只留底柱，底柱斜高为 8～10m，待开采下一阶段时回收，采幅高度为 1.2～1.4m（图 7－1）。

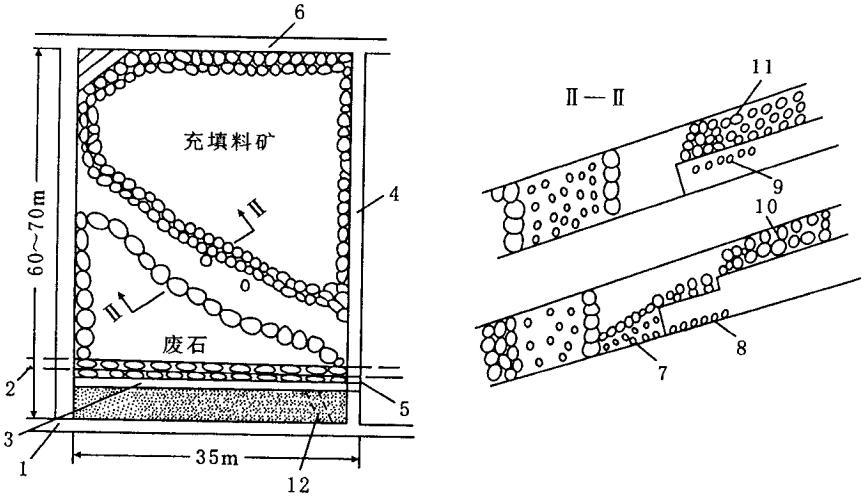


图 7－1　斜壁干式充填法示意图

1—沿脉巷道；2—底盘脉外运输巷道；3—切割拉底巷道；4—上山；5—出矿漏斗；6—上阶段沿脉巷道；7—采下巷道；8、9—炮孔；10—充填料矿石；11—围岩；12—穿脉巷道

采准切割工作：在原沿脉巷道 10～12m 下方的底板中掘进脉外运输巷道，并用穿脉巷道相联通，以便行人通风，天井开掘在采场的两侧，然后掘进切割拉底巷道和放矿漏斗。

回采工作：先从切割拉底巷道漏斗口一侧开始落矿，以倾斜工作面按分条由下向上推进。由于在充填料中凿岩困难，落矿炮孔布置在底板岩层内，孔深为 1.4m 左右，距接触面 70～150mm。采场用 17～28kW 功率的电耙出矿。充填工作是每向上采完一个倾斜分条的充填料矿石后，爆破底板岩石作为充填料充填采空区。若遇矿层较厚部分，充填料不足，可采用间隔充填，由人工砌筑一道石墙，形成条带充填体。

回采过程中要及时充填与提高充填质量，经常检查顶板的安全状况，严格控制顶板暴露面积，一般不得大于 $40m^2$，及时处理松石。

斜壁干式充填法的主要技术经济指标为：块矿平均月生产能力 270～350t，采矿工效 6.5t/工班，充填工效 3～$5m^3$/工班，贫化率 14.3%，损失率 8.8%。

②分层尾砂胶结充填采矿法

用于开采充填料加底板网脉型矿石，平均厚度 4.04m，其中充填料厚 0.6～1.0m，已压实，顶板下沉 0.4～0.6m，松动层高度为 5～6m。

采场结构参数：阶段高度为 30m，沿走向长度为 33～39m，底柱斜长为 6～10m。采场沿走向划分为 5～6m 宽的矿房与 2.5～3.0m 宽的矿柱，先后分别回采，如图 7－2 所示。

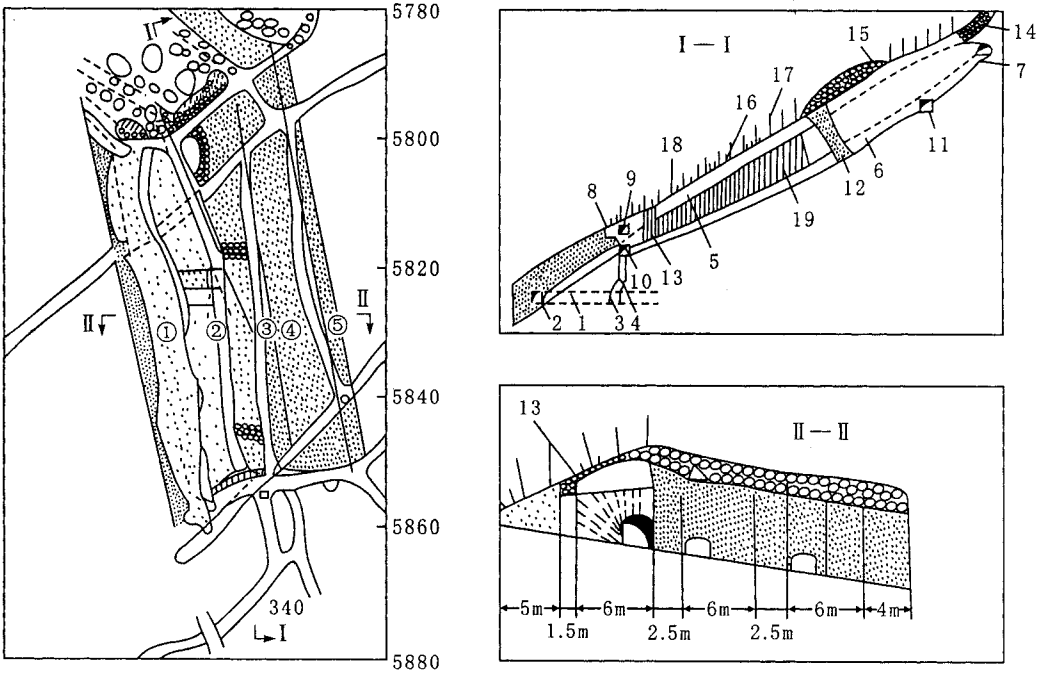


图 7－2　分层尾砂胶结充填法

1—穿脉巷道；2—沿脉巷道；3—底盘脉外运输巷道；4—放矿漏斗；5、6—上下分层超前天井；7—上阶段切割巷道；8—电耙硐室；9、10—上下分层切割巷道；11—沿脉巷道；12—矿柱；13—人工矿柱；14—充填料矿石；15—二层充填料矿石；16—短锚杆；17—长锚索；18—喷射混凝土钢筋网；19—炮孔

采准切割工作：掘进底盘脉外运输巷道，穿脉巷道，上、下分层的超前天井及分层切割巷道，放矿漏斗，电耙硐室与人行道等。

回采工艺的特点是矿房分层回采。回采上分层（充填料层）之前，在超前天井顶端先安装长锚索支护，并随着工作面推进及时安设金属楔缝式锚杆，然后再沿倾斜逐段挂金属网，喷射水泥砂浆护顶。当矿房上层充填料回采完后，由上而下后退式回采下分层的

网脉矿体。采完下分层后,随即用尾砂胶结充填采空区。上下分层的开采均采用浅孔落矿和电耙出矿。

分层尾砂胶结充填采矿法主要技术经济指标:千吨采准 20.7m,矿房生产能力 658t/月,回采工作面工效 7.56t/工班,崩矿贫化率 9.6%,出矿贫化率 6.7%,未采下矿石损失率 11.63%,采下矿石损失率 2.63%,矿石回收率 85.7%,炸药消耗量 0.233kg/t,坑木消耗量 0.00012m^3/t。

二、基洛夫铁矿二次开采实例

(1)地质条件

乌克兰基洛夫铁矿的矿体延深 1700m,走向长度为 3000m,平均厚度为 75m,倾角 45°~55°,矿石坚固性系数 f=5~7,平均含铁 54%~57%。下盘岩石为水赤铁—假象赤铁与假象赤铁石英岩,f=10~12,裂隙发育,欠稳固,平均含铁 35.7%。上盘岩石为稳.固性差的水赤铁—假象赤铁石英岩和绿泥化页岩,f=5~15。上盘倾角 40°~55°,含铁品位 23.22%~27.5%。

(2)开采状况

在 700m 和 775m 两个阶段水平上进行一次开采的回采作业,625m 阶段以上的开采工作已全部结束。二次开采作业大多在一次开采区以上 1~2 阶段进行。

(3)二次开采

为了提高矿石的回收率,该矿于 1976 年开始用地下采矿法对进行过一次开采所损失的矿石进行二次开采,多采出 107t 铁矿石。二次开采使矿石损失率降低的情况见表 7-1。

表 7-1　基洛夫铁矿地下开采与二次开采的矿石损失率

年　份	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
地下开采的矿石损失率(%)	22.7	20.5	19.2	18.1	17.1	16.8	16.2
包括二次开采在内的地下开采矿石损失率(%)	13.1	13.0	11.8	12.7	11.4	12.0	11.9

①采准工作。利用通向 550m 阶段的巷道作为 557m 水平二次开采的通风和材料运输道,利用 625m 水平的巷道作为运输巷道,其余井巷工程均要重新开凿。新的采准工程包括:先从 550m 水平掘凿一倾斜巷道到达 557m 水平,然后在 557m 水平距矿体边界 20~30m 掘进一条出矿巷道,再距出矿巷道 10m 的位置掘进一条服务巷道与之平行。从出矿巷道每隔 10~12m 掘穿脉巷道通到矿体边界,过边界后在压实的崩落矿石中再向前掘

进 20～30m。为了准备多个安全出口和通风,穿脉巷道末端相互贯通(图 7－3)。当穿脉巷道掘到矿体边界时,钻凿探测深孔以确定崩落带的压实边界,然后再将穿脉巷道掘进至安全边界,在穿脉卷道中采用可缩性金属支架支护,支架间距为 1m,过边界后支架间距为 0.5m。

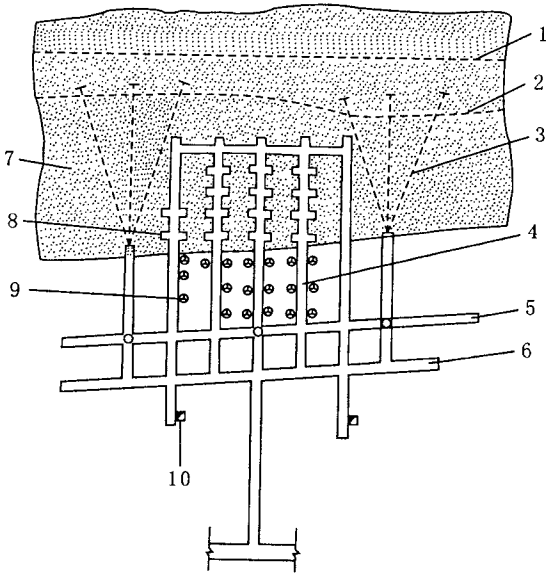


图 7－3　基洛夫矿二次开采采准布置

1—移动区边界;2—安全区边界;3—探测深孔;4—采矿巷道;5—出矿巷道;
6—服务巷道;7—矿休;8—凿岩硐室;9—漏斗颈;10—通风天扑

②矿体的回采工作。在穿脉巷道中进行盘区回采,中深孔和深孔崩矿。从电耙巷道掘进凿岩硐室,间距为 5m,自凿岩硐室开掘放矿漏斗,用深度在 10m 以下的接杆炮孔爆破形成。在下盘岩石中掘进高度为 3～5m 的放矿溜井,从这些溜井钻凿接杆炮孔,爆破后形成拉底补偿空间,补偿空间以上的矿体从下盘凿岩硐室凿岩,深孔直径为 100mm,孔深为 35～40m,扇形孔最小抵抗线为 4m,爆破落矿(图 7－4)。回采步骤是先爆破扇形接杆炮孔,局部放矿以形成松动区,然后再爆破深孔。放矿是从上盘向下盘顺序进行。采场用 JIC－30 或 JIC－50 型电耙出矿,矿石经采矿巷道耙到贮矿巷道,然后从贮矿巷道二次耙到溜井,下放到 625m 阶段水平再运走。

③主要技术经济指标。电耙工劳动生产率为 220t/工班,二次耙矿劳动生产率为 290t/工班,采矿工人劳动生产率为 51.6t/工班,千吨采准切割工程量为 4.7m(比一次开采少 0.7m)。

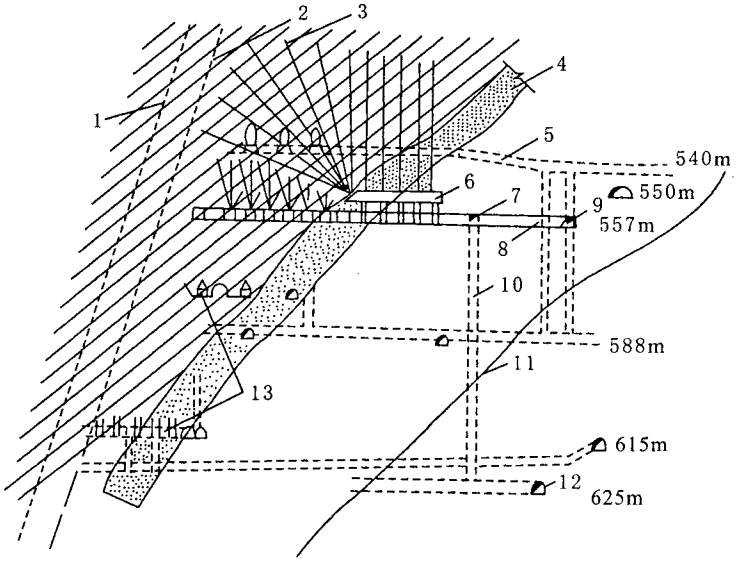


图 7－4　基洛夫铁矿二次开采的采矿方法

1—一次开采的岩移边界；2—二次开采安全边界；3—深孔；4—尔边富矿体；5—原水平通风巷道；6—未遭破坏岩体中的凿岩巷道；7、9—小矿和服务巷道；8—电耙巷道；10—集矿溜井；11—下盘岩移边界；12—运输巷道；13—一次刀开采结束的分段

第八章　海洋采矿

第一节　海洋矿产资源开发

海洋是一个巨大的资源宝库，它不仅蕴藏着大量的生物资源和能源，而且还拥有极其丰富的矿产资源。在占地球表面三分之二的海洋中，大约有15%的海底表面覆盖着锰结核。随着人口的不断增长，21世纪将需要更多的矿产资源；随着陆地矿产资源的不断开采使之日趋枯竭，向海底索取潜在的矿产资源已成为不可抗拒的趋势。人们已经把海洋作为重要的资源产地，21世纪将是海洋开发时代。

海洋采矿与陆地采矿相比具有完全不同的工艺和设备，涉及到海洋地质、潜水机械、扬矿系统、遥控遥感等一系列复杂而又先进的技术及装备。海洋采矿是一项全新的高技术产业，是一项复杂的系统工程，必须依靠科技进步，特别是应用海洋与航天等高新技术去调查海洋、开发海洋和保护海洋，才能解决人类当今面临的人口剧增。资源匮乏和环境恶化这三大问题。

开发大洋矿产资源已经成为世界许多国家的战略发展目标，世界沿海国家和地区正在进人全面开发利用海洋的新时期。我国于1991年被联合国海底筹委会批准为“先驱投资者”国家之一，已在国际公海上取得 $15\times10^4\,km^2$ 的“开辟区”和“保留区”的权利。

第二节　海洋矿产资源与工程地质环境

一、海洋矿产资源

海洋的矿产资源分布在海水中、大陆架和深海底部，可分为三类：海水中的溶解矿产资源、海底表面矿床和海底基岩内矿床。

（1）海水中的矿产资源

世界海洋水量约占世界总水量的97%，海水中溶有大量的矿物质，迄今已发现了大约77种元素，包括金属和非金属元素，如钠、镁、钙、钾、氯、硫等。海水中的铀、锂等水溶解物质是核聚变的重要原料。如果把这些元素通过核聚变燃烧所释放出来的能量相当于300个地球海域大小的油库燃烧的能量。随着相关技术的发展，未来的海洋将成为一座可供人类开发不尽的“水中矿山”。

（2）海底表面矿床

海底表面矿床可分为大陆架上、大陆坡上和深海海底三大类，海底地形如图8－1所示。

大陆架是大陆与海洋的联结部分，海水较浅，一般海水深度在200m以内。大陆架的面积约占海洋面积的7.6%。大陆架中的矿产资源主要有已经开发利用的石油、天然气、滨海和浅海砂矿等，此外还有钛铁矿、锆石、磁铁矿、铬铁矿、砂金等10余种具有工业开采价值的矿产。这些海洋矿产的开发已成为海洋的新兴产业，而且占有越来越重要的地位。

在水深为200～2500m的大陆坡上有海绿石、磷灰土、重晶石等矿产。

深海的矿产资源主要有：

①大洋多金属结核矿。这是赋存于水深4000～6000m的海底软泥之上的一种棕、黑色的团块矿石，直径大多为0.5～25cm，资源量估计为3×10^{12} t，含有镍、钴、锰、铜等55种金属和非金属。

②富钴结壳。主要赋存在水深1000～3500m的顶面平坦、两翼陡峭的海山斜坡上，色黑似煤，质轻性脆，结构疏松，厚度一般为几毫米至十几厘米，为板状、结核状或砾状海相固结沉积物。由于沉积时古海洋环境的差异，富钴结壳常呈现为成分和颜色不断变化

的多层构造特征，如褐煤状、多孔状或无烟煤状的结壳分层。富钴结壳的钴含量可高达2%，贵金属铂含量相当于地壳含铂量的80倍。富钴结壳的基本矿物组分为非晶质或隐晶质的Fe、Mn物质，冶炼工艺较为复杂。据不完全统计，太平洋西部火山构造隆起带上，富钴结壳矿床的潜在资源量达109t，钴金属量数百万吨，经济总价值超过1000亿美元。

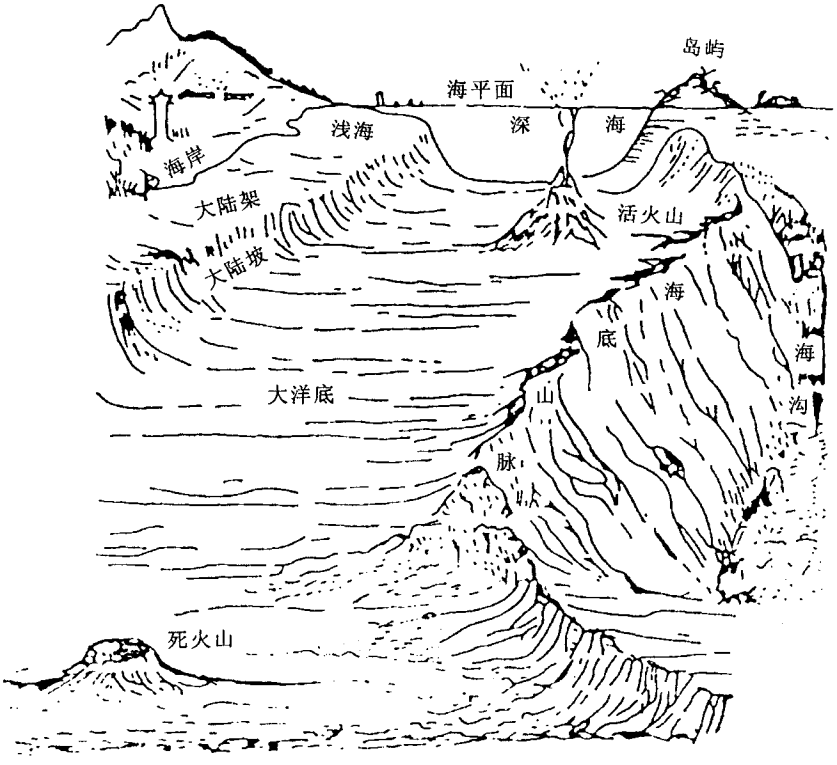


图8－1　海底地形示意图

③海底热液硫化物矿床。海底热液硫化物富含Cu、Zn、Fe、Mn、Pb、Ba、Ag、Au、Co、Mo等金属和稀有金属，赋存在水深数十米至2500m的海底，且大量出现在2500m附近，易于开采和冶炼。

（3）海底基岩内矿床

海底基岩与陆地岩层的地质环境类似，陆地岩层中赋存的矿物在海底基岩中均有发现。目前主要开采近海与浅海基岩中的煤、铁、硫等矿物。

二、海洋工程地质环境

（1）海洋沉积物的工程地质特性

海洋沉积物为未固结的矿物或有机物的结合体，主要有陆源碎屑（粘土、粉砂等）、生物颗粒（海底生物残骸）和化学成因颗粒（多金属结核）等。从近海至海底深部，沉积岩的颗粒由粗到细。近海岸和半深海底沉积物主要由陆源物质组成，随着进入到深海海底，生物碎屑和化学物质明显增多。

在海洋沉积环境中，由于物理变化、胶结和生物改造作用，使海洋沉积物与陆地沉积物的工程地质特性有很大差别。海底沉积物具有高含水量、高空隙率、高压缩性和低强度等特点。

海洋沉积物在波浪和潮汐等动力荷载的作用下，表现出液化性、触变性和蠕变性等力学特征。在深海环境中，由于生物颗粒的影响，海洋沉积物的比重明显下降。细颗粒的海洋沉积物具有高含水性，呈软塑状态和流塑状态。海洋沉积物的抗剪强度很小，有的几乎为零。

（2）海底的不稳定性

对大陆架、大陆坡及浅海地区的调查证实，海底松散沉积物广泛存在滑移现象。在近海岸滑坡范围一般为几百米，在深海中大规模的滑移可达几百千米。海底的不稳定性是海洋采矿的最大潜在威胁。

海底的不稳定性有以下几种形式：

①沙波。海底沉积物的现代搬运作用。

②浅气层。海底地层由于有机物腐烂作用而生成，在特定条件下，气层气体喷出。

③埋藏河道。在现代海底水深 150m 的范围内，普遍存在充填物为松散软塑的土质层。

④断裂作用和地震活动。活动断裂可以造成表层沉积物的位移，地震作用所产生的水平加速度能导致海底沉积物的液化及斜坡不稳定现象的发生。

⑤块体移动。表现为海底的滑坡、崩塌、泥流和其他类型的滑塌。

第三节　海底矿产开发系统

一、影响海洋矿产资源开发的因素

影响海洋矿产资源开发的因素主要有以下几个方面：

①矿床位置。离岸距离决定是否需要大型海上基地,涉及精矿运输、人员往返等问题。

②气象和海况。台风与飓风要求海底集矿装置和海上作业基地具有灵活的可移动性,以便风暴来临时退避和确定采矿系统的工作参数。

③水深。高晶位的结核矿石一般分布在水深大于 3000m 的海底,当水深为 6000m 时,采矿设备所承受的水压达 60MPa,必须保证采矿系统在高压下的安全。

④结核分布的丰度。结核分布情况决定生产规模、采矿成本等。

⑤海底地形与地质。海底的地形及地质力学性质决定集矿机适应条件。

⑥集矿方法。由于结核半埋于海底沉积层中,因此需要决定掘削的粘土厚度与采集方法。

二、海底矿产开发系统

海底矿产开发系统是一项复杂的高技术系统工程,包括在海底矿产开采过程中所进行的研究、实验和试生产等工作。整个开发系统的构成如下:

- 海底矿产开发系统
  - 地质勘探、矿床评价
  - 开发规则、技术开发
  - 开采、冶炼
  - 经济评价
  - 生产规划、生产管理
- 采矿系统(破碎/剥离、移动、集矿、给矿)
- 扬矿系统(泵送/提升/管道)
- 分选、选矿、贮矿系统(海底/船上)
- 遥测、遥控和动力系统
- 运输系统
- 海上基础(船型、平台型和半潜型)
- 冶炼系统
- 后备、辅助系统

三、海洋地质与海洋采矿的研究内容

(1)海洋地质调查

了解多金属结核等矿物资源的分布规律,探明其形态、类型、覆盖率、丰度、品位变化、赋存水深、地形特征及伴生沉积物类型和性质等。目前采用的探矿设备包括海底采样器、光学探测仪及声学探测仪等。

(2)海洋采矿系统开发研究

研究海底矿岩的物理力学性质,包括干密度、湿密度、松散密度、含水量、孔隙率、抗水性、渗透性、切割性、磨蚀性等。以现有的海底锰结核采矿技术为基础,不断研究改进采矿船(或平台)、水下提矿设备、海底其他采矿机械以及遥控装置等。深海采矿系统的

流程如图 8－2 所示。

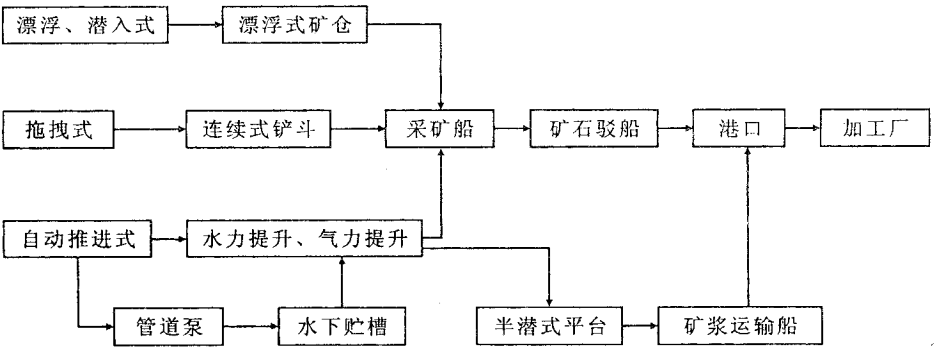


图 8－2　深海采矿系统的流程图

采用水力提升的海洋采矿系统如图 8－3 所示。该系统由集矿机、扬矿、监控、采矿船、运输五个子系统组成，在海底表面采集矿石的集矿机由采矿装置、分离装置、行走装置、液压和电气系统等组成。集矿方法可分为两类：一是机械式集矿，利用类似于耙子的装置在沉积物中捞取结核；另一类是流体动力式集矿，根据射流原理，利用高速运动的流体产生的压差吸取结核和沉积物。分离装置利用高压水或格筛分离结核和沉积物，只将矿石供给扬矿管。集矿机在海底行走有两种方式：拖拽式和自行式。拖拽式集矿机的行走装置通常是采用滑板式结构。自行式集矿机采用独特的阿基米德螺线行走装置，该装置在集矿机两侧各装一个可绕固定轴转动的圆筒，圆筒上焊接的条形铜板形成阿基米德螺线。经试验，该装置具有良好的行走特性，以及在软泥上的良好的抗沉陷性能。扬矿系统的功能是将采集的结核矿石经管道提升到海面采矿船上，主要由供矿装置、柔性软管、中继矿仓、离心泵组、主提升管道、避风浪解脱装置等组成，供矿装置安放在集矿机上，将采集的结核矿石经柔性软管送往中继矿仓。中继矿仓安放在刚性扬矿管道下端，离心泵组将矿仓内的结核矿石以 10% ~ 20% 的体积浓度从海底提升至海面采矿船上。操纵与监控系统主要包括各系统的数据采集和处理系统、控制系统及水中测位的声响系统，是从采矿船上将集矿机和扬矿管等海中设备迅速而安全地装卸、下放和回收的装置（转臂起重机等设备），监视并控制集矿和扬矿等作业安全而有效地进行。采矿船是深海采矿作业的乎台，为海下设备提供支承、动力、存放和维修，同时完成结核矿石贮存并向运输船转运。运输子系统将结核矿石运输到口岸，并向采矿船供应补给品及人员轮换。

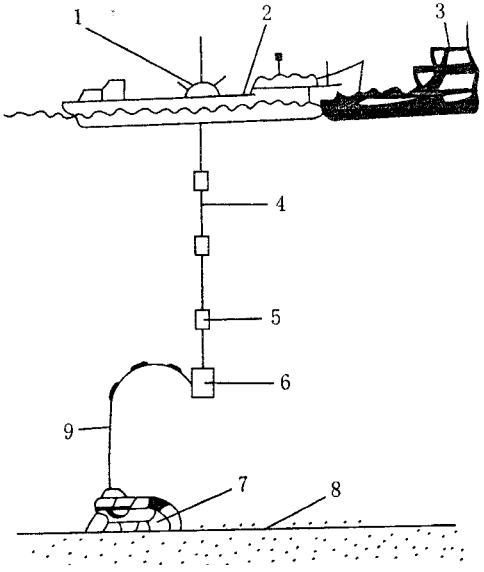


图 8－3　水力提升采矿系统图

1—分选系统;2—采矿船;3—运矿船;4—扬矿管;5—泵;6—中继站;7—集矿机;8—结核;9—软管

采矿工序为;采矿船到达采区后,将集矿机和提升管接好并逐步放入海底,提升管上端置于采矿船上,集矿机将结核收集到一起后,利用射流对结核进行冲洗,将大部分粘着沉积物冲洗掉,然后碾碎结核,允许破碎结核以较高的浓度输送,防止提升管道阻塞。提升管由一根 4～5km 长的管道或一组连接管组成,通过提升管道把矿浆(包含破碎结核、底层水和沉积物)从海底集矿机系统传送到海面的采矿平台,这种技术主要借鉴于海上石油和天然气开采业。

从管道提上来的矿浆到达采矿乎台后,进行脱水处理,最大限度地减少矿石的体积重量比,便于运输。经分离后的残留物经过排污软管排人海中。结核矿石暂时储存在采矿平台上,或转送到矿石运输船上,运到岸上冶炼厂。海底采矿

一、海底采矿方法

表 8－1 列出了针对各种海洋矿产资源的开采方法,其中 1、3 类矿产都有成熟的开采方法,下面主要介绍开采结核矿的四种方法。

表 8－1　海洋矿产资源开采方法

编号	海底矿产	可采用的开采方法	使用与研究现状	最终产品
1	石油、天然气	石油钻井平台、钻探装置、海底采油系统	已进入工业化生产,非常成熟的开采技术	提取石油、天然气

编号	海底矿产	可采用的开采方法	使用与研究现状	最终产品
2	多金属结核矿	1. 连续索斗提升采矿系统 2. 管道提升采矿系统 3. 穿梭潜水集矿机系统 4. 海底自动采矿系统	基本完成小试，进入中试阶段；管道提升采矿系统被认为是非常有前途的开采方法	提炼出具有战略意义的多种金属
3	其他矿产	各种采掘装置和大深度挖泥机	基本成熟的方法，进入工业化生产	提取铁砂、金砂、锡砂及其他矿物

（1）连续索斗提升采矿系统

连续索斗提升采矿系统（continuous line bucket system 简称 CLB 法）由采矿船、无极绳斗、绞车和万向支架等组成。无极绳斗由一条首尾相连的高强度无极绳和一系列铲斗组成，铲斗固定在无极绳上，铲斗间距 25 ~ 50m。采矿时，借助绞车、导向滑轮和方向支架等设备，将无极绳斗从采矿船上投入海中，使铲斗呈曲线接触海底。开动船上的绞车带动无极绳斗，使无极绳斗在采矿船与海底之间循环翻转。铲斗较低一侧在海底掠过，铲起结核、底部沉积物、底栖生物和其他物质，从海底提起，到船上倾倒，接触海底的铲斗不停地铲挖海底的结核，并提升到采矿船上，从而实现结核的连续开采（图 8 - 4）。

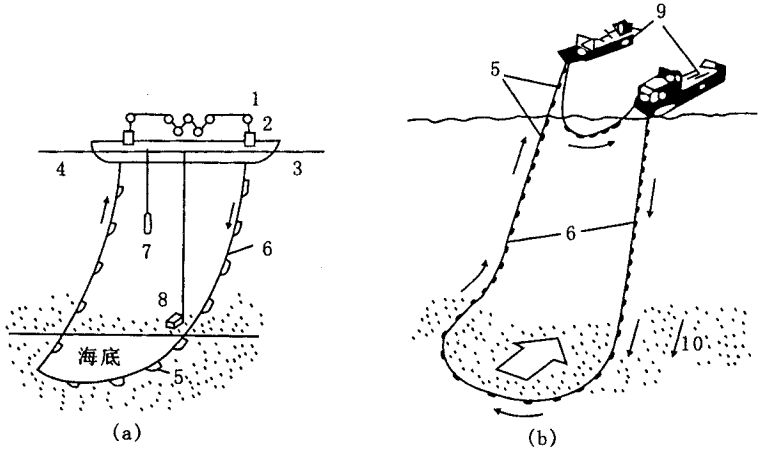


图 8 - 4　连续索斗提升采矿系统图

（a）单船作业；（b）双船作业

1—绳索驱动装置；2—天轮；3—船首；4—船尾；5—索斗；
6—绳索；7—声纳探测器；8—摄像机；9—采矿船；10—锰结核沉积层

铲斗大多采用金属网或有眼的盒子，在绞起过程中，沉积物可以被冲掉，结核留在铲斗中。铲人海底沉积物的深度在某种程度上可以由采矿船速度和机动性加以综合控制，并且在铲斗上安装角齿和滑行架。

连续索斗提升采矿系统有单船作业和双船作业两种方式。单船作业方式进出的两根绳索相距很近,易使绳斗互相缠绕,影响采矿作业的顺利进行。为克服单船作业的绳斗缠绕问题,可采用双船作业方式:一只船放绳入海,另一只船将装有多金属结核的绳斗从海中收进,卸完结核后,立即将空绳斗传递到第一条船,再送入海中,如此循环进行,实现结核的连续开采。

这种方法的特点是:设备简单,机械装置在船上,维修方便,准备及搬迁时间短;铲斗工作受水深和海底地形变化的影响不大;缆绳能平衡船的摇摆,减轻波浪对作业的影响;对多金属结核的块度要求不严格;设备投资少,生产成本低等。目前存在的主要问题是该系统难以控制,结核的回收率低,日采矿能力低。铲斗铲起海床上的结核和沉积物时,造成近底羽状流,明显污染附近海底环境。

(2)管道提升采矿系统

管道提升采矿系统主要由集矿、扬矿、操纵和监控四部分组成(图 8-5)。

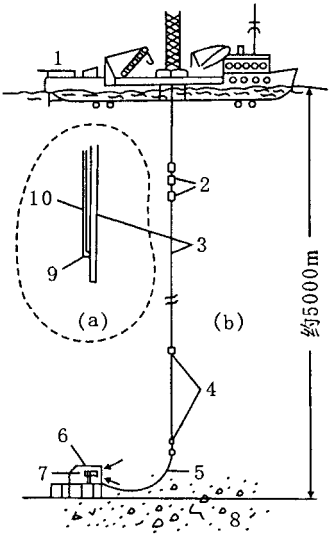


图 8-5　肯尼科特财团采用气升式扬矿管道开采方案示意图

(a)气升式;(b)泵举式

1—采矿船;2—泵;3—钢管;4—测量接头;5—柔性管;
6—集矿机;7—海底电视;8—锰结核;9—注入压气孔;10—压气管

①集矿。利用集矿机在海底表面采集矿石,集矿方法有水力式、机械式和水力,机械混合式三种。

②扬矿。扬矿是将集矿机采集到的结核提升到采矿船上。目前采用的管道提升方法有泵提升和气力提升两种方式。泵提升是在扬矿管道途中适当的位置安装多台大功

率的潜水砂泵,通过流体静压力进行提升,该静压力足以克服由摩擦和锰结核自重产生的压力损失,将矿石提升至水面采矿船。气力提升是由装在船上的空压机将高压空气送入浸在水中 3000～6000m 长的扬矿管道中,使管内密度减小,管内所形成的负压和管外的海水压力产生压差,形成上升流,将含锰结核的混合海水提升至水面采矿船。

③操纵。采矿船上的操作机械用于集矿机和扬矿管道等设备的装卸、下放和回收。

④监控。对集矿机、高压潜水泵或空压机以及海底检测分析仪器的监控,通过数据采集、数据处理和计算机集中控制,监视并控制集矿和扬矿作业。

管道提升式采矿方法配用自行式遥控集矿机,具有灵活性好,能避开海底障碍物与不利地形,采矿效率较高,开采规模大,技术难度小等特点。我国优先发展的自行集矿机集矿、泵提升的采矿方法的生产能力为 1.5×10^6 t/a。

工作过程是:当采矿船到达采区后,将集矿机和提升管接好后逐步放到海底,提升管上端悬置于采矿船,集矿机用于采集海底沉积物中的结核并进行初处理,在除去过大结核的同时将合格尺寸的结核输入提升管底端,以水力或气力提升方式使管内的水以足够的速度向上运动,将结核输送到海面采矿船上。

(3)无人潜水穿梭机系统

无人潜水穿梭机采矿系统(图 8－6)相当于装有集矿装置的潜水器,兼有对多金属结核的采集和运输功能。该系统由螺旋推进装置、支承系统、采集系统、车内传输系统、压载物和矿核存贮室、浮力材料、蓄电池和辅助推进系统组成。

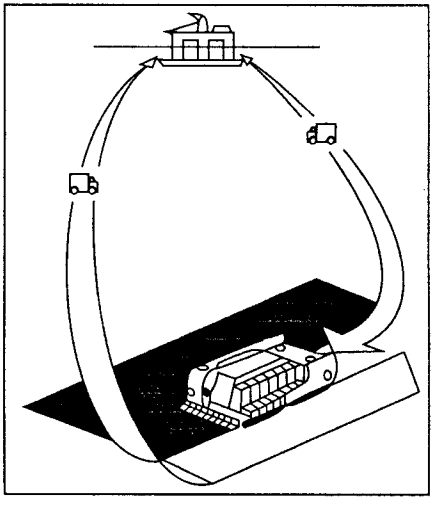


图 8－6　无人潜水穿梭机采矿系统

工作过程是:先借自重把潜水穿梭机沉入海中,在接近海底时进行卸载减慢下沉速

度,使采矿车轻轻着地,抛弃部分压仓物,并收集结核。当采集的多金属结核装满采集矿仓时,抛弃剩余压仓物,从而使装满金属结核的潜水采矿器浮出水面,卸掉矿石,装满压仓物后再潜到海底进行下一次采矿。

潜水采用高能蓄电池作为动力,是无缆的无人潜水器,可用履带行走,也可用螺旋桨潜行。由于安装了各种探测、TV 控制元件,它可以自由行走,提高了采集效率。可根据产量要求配备多台穿梭机穿梭往来,类似陆上的自行矿车或铲运机。

系统的最大优点是各穿梭机相互独立,一台出现故障不会影响整个采矿系统,机动灵活,不需长距离运输管道、泵送或压气设施,材料消耗和能耗少。缺点是该装置制作需要较高的技术,成本昂贵,且每次采集量有限,沉浮时间长,不及前述管道提升开采法经济。此外,该系统集矿过程中有相当数量的压仓物留在海底,对环境有明显的危害。

(4)海底自动采矿系统

海底自动采矿系统(automatic submarine mining system)是连续铲斗提升采矿系统和潜水穿梭机系统的结合体,是加设了提升管道的穿梭集矿系统,或是由遥控潜水采矿机代替连续铲斗的采矿系统。

二、尾矿的组成及特点

尾矿主要由底层海水、间隙水、沉积物、结核碎屑和底栖生物碎屑组成(图 8 – 7)。与周围的海水相比,具有温度低,密度大,悬浮颗粒物质、营养盐和痕量金属含量高等特点。

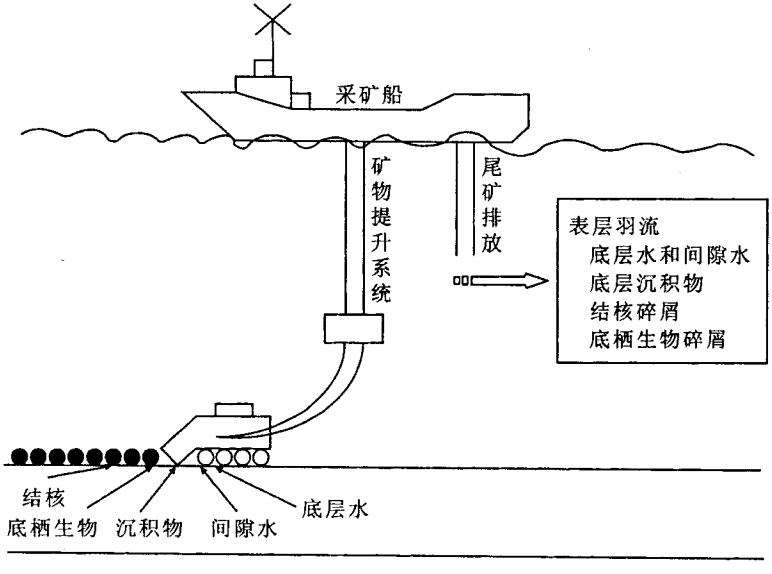


图 8 – 7　深海采矿系统采集的矿物组分及排放的尾矿组分

三、海洋采矿面临的问题

丰富的海洋资源引起了世界各国的关注，它存在着政治、经济与技术等多方面的具体问题。

（1）技术问题

海洋采矿是一项涉及诸多学科的高技术密集型产业，也是一项极为复杂的系统工程。海洋采矿涉及到海洋资源的勘探、采矿、选矿与冶炼方面的一系列复杂的技术问题。海洋资源的勘探必须使用最先进的勘察手段查明海底资源的分布及品位、资源数量、资源环境，显然这绝非易事。深达五六千米的海底，水的静压可达五六百个大气压，如果要算海底最深的马利亚纳海沟，深达 11036m，压力将达到 1100 多个大气压，因此，海洋采矿技术难度大，必须借助仿生学研究潜入深海底耐高压的采掘设备和机器人。制造这种水下设备和机器人的技术难度完全可与进入宇宙空间的技术相比拟。就水下机器人来说，它是载体系统、电控系统、声学系统、水声通讯、图像压缩与处理、计算机体系结构、人工智能、高效能源、流体力学、深潜技术、水面收放技术等多项高技术的集成。目前美、日等国虽有可潜入 4000～6000m 深的海底潜水器，我国也已研究成功可潜入 1000m 深处的水下机器人，但要达到采掘生产的实用阶段，还要走很长一段路。目前，美国、日本、德国、法国、俄罗斯、印度等国都在研究深海底锰结核的采集与扬升技术。至于深海钴壳矿床与热液矿床，因为是坚硬的固体矿床，比锰结核的开采难度要大，还需研究深海的水下破碎技术。

（2）经济问题

海洋采矿的科学研究需要投入巨额的资金和集中大批优秀的科技人员。海洋采矿的生产是以海洋采矿的综合成本（勘察、采矿、选矿、冶炼成本之总和）低于陆地采矿成本为前提。大陆架资源因其近陆和海水较浅，开发技术比深海开采容易，采矿成本不算很高，实际上大陆架的矿产资源早已为多国所开采。从海水中提取所需元素和开采深海底的各类矿床则较困难，除政治和技术因素外，采矿综合成本大大高于陆地成本，经济问题制约海洋采矿的发展。

（3）环境问题

保护海洋生态环境是海洋采矿必须重视的问题。深海采矿对海洋环境造成的影响主要包括：海底地貌的改变，生物群落及其栖息环境的破坏，同时还有维持生态环境所必需的物理过程的损害等。

第九章　太空采矿

第一节　太空资源及其开发

一、太空采矿及其原则

21 世纪，人类将实现太空采矿（Mining in space）的理想。

地球上人类的文明史随采矿业的发展而发展。例如旧石器、新石器、陶器、铜器、铁器、原子能时代都是以矿冶文明为标志。地球上的矿物尽管十分丰富，目前尚未耗尽，但总是有限的。随着宇宙时代的到来，太空矿物资源的勘探、开发和利用已为期不远。太空采矿的原则有三方面：一是月球基地的建设必须就地取材，如果依靠从地球输送原料至月球，其成本很高；二是以月球为基地进一步开发宇宙空间（如火星等），就必须由月球提供燃料和生活必需品；三是为满足地球的需要，可从月球上开采新的和稀缺的材料。

二、太空矿产资源

科学家发现一颗由整块坚硬金刚石构成的恒星，位于半人马星座，是银河系中距地球最近的恒星之一，只有 17 光年，同地球一样大。1994 年，由美国、英国与欧共体联合发射的一颗紫外线探测卫星，探测到位于双子星座以东、狮子星座以西的巨蟹星座中有一颗直径为太阳 3 倍的明亮星球，它的表面有一层富金矿覆盖，黄金储量达 1000 多亿吨，为地球的 160 万倍，是一颗真正的金星。一些小行星富含铁、镁、金、钨、铱、银等贵重金

属元素。月球上的矿物引人注目。

显然,太空矿产资源开发具有广阔的前景。

第二节　月球的矿产资源与环境

一、月球的矿产资源

月球表面覆盖着风化层、流星碎屑层和直径达数米的一些巨砾。风化层为 20μm 大小的细粒,流星碎屑层含 40～130μm 的细土壤和不同规格的岩石屑。风化层平均厚度在月球海(阴暗区)内为 5m,在高地为 10m。月球海的形成是大量玄武岩流充满远古环形山,经日风作用形成浅滩的广阔平原。这些浅滩类似于地球河床,岩层厚达 16m,风化层厚仅 10cm。月球矿产资源主要是火山岩,小部分是太阳风形成的沉积物,几乎 99%的月球物质是由七种元素组成,即 O、Si、Mg、Fe、Cu、Al 和 Ti。玄武岩含 TiO_2 的范围为 0.5%～13%。月海玄武岩的铁和钛主要赋存于钛铁矿中,玄武岩中钛铁矿占到 10%～12%,绝大部分高钛月海玄武岩含钛铁矿大于 15%。表 9－1 列出了阿波罗 12 号登月探测器采集的月海玄武岩中钛铁矿的成分特征,其中钛和铁含量极高。钛铁矿不仅是铁、钛和氧的主要资源,而且钛铁矿与氢反应所产生的水($FeTiO_3 + H_2 \longrightarrow Fe + TO_2 + H_2O$)将是未来月球获取水的重要途径之一。

表 9－1　月海玄武岩中钛铁矿的化学成分

编号	12038－9	12038－63	12039－3	12051－59	12070－5	12075－25
测定颗粒	平均值 20	平均值 10	平均值 13	平均值 20	岩石碎块 1	岩石碎块 1
比例(%)						
TiO_2	53.20	52.40	53。80	51.30	53.70	53.40
FeO	41.50	47.00	46.60	45.80	39.90	33.90
Al_2O_3	0.08	0.45	0.50	0.46	0.09	0.17
Cr_2O_3	0.57	0.12	0.17	0.29	0.82	0.40
V_2O_3	—	0.03	0.03	<0.02	—	—
MnO	0.41	0.44	0.37	0.44	0.42	0.43
MgO	3.70	0.06	0.10	0.45	4.00	9.60
CaO	0.13	0.08	0.0l	0.64	0.27	0.17
合计	99.59	100.58	101.58	99.40	99.20	98.07

已发现月球上有近百种矿物,它们包含的大量元素在地球上稀少,如钇和稀土元素。月球对人类最富吸引力的是土壤中含有大量气体状的氦－3。它大量存在于太阳喷射出来的高能离子流(太阳风)中,降落在月面的沙粒和岩石中,聚集了上百万吨这种材料。氦—3同位素是最好的热核材料,"氦－3和重氢核聚变所产生的能量为6×10^{17}J,30t氦－3所发的电量就够美国用一年。月球上的氦－3足够地球人用上数千年。

月球采矿的首选资源是含氧和氢的矿物,即开采月球表土取氢,开采表土或低晶位浸染状钛铁矿取氧,合成生活用水,并生产火箭燃料,为继续太空旅行提供动力,使月球成为火星等远航目标的中继站。如果考虑月球农业生产和加工Fe、Si、Ti、Mg和其他金属材料用于制造业,则应研究含碳气体的生产。

月球上的百万吨氦－3所含的巨大潜能,令世界科学家神往。

二、月球环境

月球的气候环境参数及其对开采的影响如下:

(1)月球表面的辐射热和温度变化大,白天与黑夜、阳光和阴暗面的温度变化是－171℃～＋111℃,温差高达281℃,且温度变化快,导致暴露的材料产生严重的热应变。

(2)有强烈的太阳辐射和高能日辉,银河系的宇宙射线产生严重的屏蔽问题。

(3)没有空气,在白天至黑夜的循环过程中,月球表面的真空度为1.333×10^{-6}～1.333×10^{-10}Pa,这种真空状况将导致许多润滑油和密封材料严重漏气和裂解,以及凿岩过程中将出现岩屑排出困难,导致严重的钻孔堵塞。

(4)月球昼夜循环时间长,等于地球的28天。

(5)月球重力为地球的1/6,在材料运搬过程中将造成物体运动的非自然动力现象和不寻常的影响。

(6)存在微陨石对月球表面的连续轰击,这些陨石实际上是球形宇宙尘颗粒,质量通常为10^{-7}～10^{-4}g,速度平均为2000m/s。

(7)月球表面能见度低。

月球地质环境很复杂,在无污染的绝对真空中,岩石强度和表面摩擦力大大高于地球环境下的数值。由于没有孔隙,岩石可能具有较高的表面能和较大的粘结力。

第三节　月球采矿工艺与方法

月球采矿与地球采矿一样，人们必须通过资源评价以确定开采规模、储量、矿物品种和数量等开采条件。

在可供开采的矿点确定以后，应研究适于月球环境的采矿工艺与方法。迄今，大量研究结果表明，月球表面采矿工艺应采用高度自动化和遥控的挖掘、装载和运输设备。

一、月球矿物露天开采

在月球表面进行露天开采，将在材料参数与结构上遇到一系列难题：在月球表面的超真空与极低温度环境下，除密封和润滑油容易变质外，在疲劳、可延展性、表面摩擦方面会出现问题；月球采矿设备需有宇宙空间应用的润滑标准，含有挥发成分的密封和润滑油在月球上很快变质，由于低温还会出现疲劳；微陨石的轰击会损坏暴露表面；由于重力减小，设备的稳定性成为一大问题；适用于月球采矿的移动式设备如挖掘机、装载机和运输机的质量重心设计必须远低于地球采矿设备；对移动电源的设计也一直争论很多。

美国矿业局 1990 年完成的月球采矿技术初步评价关于露天开采的设想有三个可行方案：第一方案是铲运机配松土器或凿岩爆破；第二方案是反铲配汽车；第三方案为移动式挖掘装载机配汽车。无论哪种方案，其设备均需解决以下问题：微陨石碰撞防护，低重力下的稳定性，就地取材制造炸药，设备自动化，遥控与机器人操纵，可在真空低温下工作的高强度、高耐久性轻型材料的制造，蓄电池、燃料电池或辐射能源的供应。

二、月球矿物地下开采

采用地下开采方法可减少露天开采带来的一些问题，如月球表面太阳辐射作用和超高真空给露采作业带来的危害等。地下开采玄武岩中的钛铁矿预计其含量较风化土壤高 2 倍。在岩石破碎方面凿岩爆破将是基本工艺。加拿大诺兰达技术中心研究了等离子爆破技术，即利用电容器的放电使钻孔中的电解液汽化产生高温高压等离子，用以破岩，但距离应用还为时尚早。地下开采的另一优点是在采矿作业完成后，可用微波熔化和化学涂层处理采空区，为地下加工厂和月球矿工居住提供安全场所。美国矿业局还建议采用密封挖掘机，以便创造类似于地球环境的作业条件，但还存在废热排放问题。根

据对月球环境的最终分析与评价,月球地下采矿可能是更易于接受的采矿方法。

美国矿业局提出了地下开采的三个方案:第一方案为机械式岩石挖掘;第二方案为凿岩爆破方法破碎矿岩;第三方案是热力破碎矿岩。凿岩破碎可用冲击锤、连续采矿机、巷道掘进机、螺旋钻、微波破碎和超声振动破碎等。

地下采矿设备要求解决的问题与露天采矿设备相同。目前地球采矿采用的设备不适于月球,必须重新设计。同样,上述两类采矿方法及其方案也还需要进行严密的理论与工程研究。

第四节　月球采矿探索进程与展望

一、月球采矿探索进程

世界技术先进国家早已瞄准这块宝地,空间竞争已经开始,回顾人类奔月的进程和计划有助于我国太空采矿事业的更快进步。

20 世纪 50 年代以来,有关文献已多次论述人类在月球勘探和定居的种种问题。1962 年,美国实施阿波罗计划期间就已认识到月球采矿的需要,成立了地球外资源工作组,任务是减少月球和太空开发对地球资源的依赖性。1967 年美国无人驾驶 Surveyor – Ⅲ宇宙探测器成功地带回了月球土壤。从 20 世纪 60 ~ 70 年代,阿波罗 15 次绕月与登月飞行,对月球环境做了大量研究。

1989 年,美国国家航空与航天管理局成立了地球外采矿与建设指导委员会,任务是评价行星表面的各项活动,弄清月球采矿与建设相关的各种问题。1990 年美国矿业局完成了月球采矿技术的初步评价,并提出了露天与地下采矿的可行方案。1991 年由法国国家动力局主持的一次大型太阳能卫星国际会议提出建立太空动力系统,把月球变为地球的大型发电站,从月球表面采集大量的太阳能发射到地球上,欧洲和日本对此表现出特别的兴趣。美国一批科学家成立了月球太阳能电站联合研究组,以促进与此相关的研究。

一个由阿尔科公司、麦克唐纳·道格拉斯太空设备公司和太空研究所组成的研究机构进行了太阳热力工艺试验,以便用最少的物质与手段生产最终产品,例如利用直径 12m 的太阳能聚能器和月球表土制造砖块、构件、玻璃和纤维。

建造一个月球起居点约需 20t 材料，除用于屏蔽和建筑用途外，月球上生产的氧最终可成为一种“出口”产品。

美国航空航天局宣称，将费时 10 年，耗资 1000 亿美元在月球上建立一个可供人居住的月球城，95%的建材就地制取，城内氧气供应由火成岩提取。整个工程分两阶段实施：先由太空人在月球停留 30 天，然后逐渐延长，并在月球上开辟临时基地。预计至 2015 年，月球上的中小型永久基地将交付使用，月球移民将增至上百人。第二阶段，待月球上各项设施进一步完善可自给自足以后，月球移民将达上万人。

二、月球采矿展望

当今，地球的地平线已极大地向外扩展了，人类将去太空采矿和生活。这一大胆开拓新的采矿领域的活动振奋人心。

对采矿业而言，出现了新的机会，即参与太空采矿与选矿计划和成为最终派生新采矿技术的受益者。太空采选技术存在的问题必定引起矿业界的注意，只有当采矿工业在太空采矿系统的设计和操作真正起到作用，太空采矿系统才真正建立，整个领域将是全新与广阔的。采矿工程技术人员现已面临把勘探、矿床圈定、设备设计、采选工艺等知识应用到太空开发中去的时候了。花在太空采矿方面的投资将有助于解决地球资源的不足和品种的稀缺而得到加倍的补偿。

月球采矿将直接有助于行星采矿。自动化采掘设备和新型采选方法将面临巨大挑战，太空可能是研究的最终场所，但离不开地球采矿技术的高度发展。

世界上已有许多国家的矿业公司、大学和研究机构面对挑战并赢得了发展机遇。加拿大镍有限公司投资 2000 万美元制订了采矿机器人系统开发的长远计划，旨在有助于地球深部矿物的开采、地层条件恶劣或有危险矿体的开采，并为海底采矿、有毒废物清理和太空采矿的自动化系统奠定基础。

欧洲最大的制造厂家利布赫尔（Liebhery）正投人大量资金开发自动化设备，乌克兰的切尔诺贝利尚留有 150 台该厂生产的从 10km 外进行遥控的挖掘机和推土机，日本小松（Komatsu）株式会社制造的海底采矿推土机通过电缆从海岸上进行遥控操纵，澳大利亚地下钻机制造公司（Ausminco）已完成遥控钻机试验，可实现无人接杆凿岩。澳大利亚莫那什（Monash）大学和悉尼大学成立了国家应用现场机器人技术中心（National Center for Applied Field Robotics），该中心拥有据称是世界级的试验设施和专用试验区，旨在研究开发采矿机器人技术、激光和卫星定位系统，以及利用尖端雷达技术、远距离电视和遥测系统等。

我国载人宇宙飞船已发射成功,制订了登月计划;我国的深海无人采矿技术研究正在取得进展,它们将为我国太空采矿奠定基础。

上述国家在采矿自动化系统方面的研究无疑增强了各自在采矿工业方面的竞争能力,发展了一种有生命力的支柱技术产业,进一步跻身于太空采矿领域。

地球采矿技术是月球采矿技术的基础,月球采矿技术是地球采矿技术的发展。采矿业将创造从地球走向太空的辉煌。