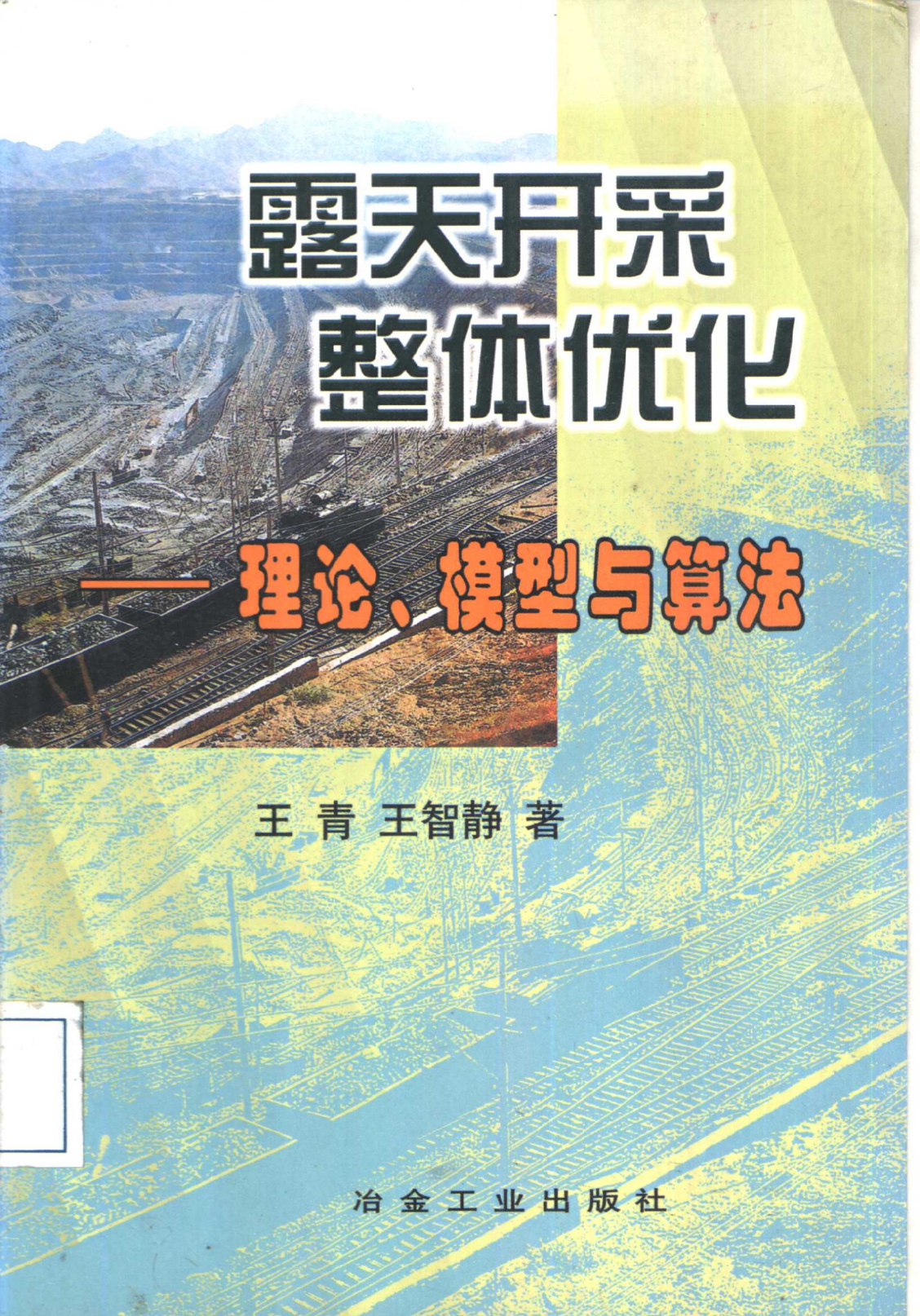




露天开采 整体优化

——理论、模型与算法

王青 王智静 著

冶金工业出版社

TD804
W-649

华夏英才基金资助出版

露天开采整体优化

——理论、模型与算法

王 青 王智静 著

冶金工业出版社

2000

图书在版编目(CIP)数据

露天开采整体优化——理论、模型与算法 / 王青 王智静 著,
—北京:冶金工业出版社, 2000.7
ISBN 7-5024-2605-1

I. 露… II. ①王… ②王… III. 露天开采—最优化
IV. TD804

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 60294 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)
责任编辑 宋良 美术编辑 王耀忠 责任校对 符燕春 责任印制 唐克铭
昌平百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销
2000 年 7 月第 1 版, 2000 年 7 月第 1 次印刷
850mm×1168mm 1/32; 8.375 印张; 230 千字; 256 页; 1.1500 册
18.00 元



冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64044283
冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

自然资源是人类赖以生存的物质基础，如何在有限的自然资源条件下实现社会与经济的可持续发展，是当今世界面临的一个重大课题。矿产资源的有效开发利用是这一课题的一个重要方面。在过去的 50 年特别是改革开放后的 20 年里，我国的经济发展是以矿产资源的高消耗为支持的。从现在到 21 世纪中叶，我国的经济将处于工业化全面发展时期。根据矿产资源消费生命周期理论和发达国家的发展经验，这一时期的经济发展对矿产资源的消费强度在经济发展的各个时期中是最高的。然而，我国矿产品供给的保证程度、矿产开发现状及其前景不容乐观。一方面，多种支柱性矿产品的供给缺口较大；另一方面，在矿产开发中存在着宏观调控欠科学、矿山生产经营方式粗放、技术落后、管理水平低下、经济效益低和资源浪费严重等诸多问题。因此，我国经济的可持续发展有赖于矿业的可持续发展。

实现矿业可持续发展，需要建立两大支柱：一个是在行业层面上以科学决策为基础的矿业宏观调控；一个是在矿山企业这一微观层面上以现代科学技术为基础和手段的优化开采。前者是矿业可持续发展的制高点，后者是矿业可持续发展的具体实现。

进入 20 世纪 80 年代后，发达国家在矿业领域的技术发展主流是以计算机为核心的自动化技术、信息技术和优化技术在矿山生产与经营管理中的推广应用。这些现代科学技术的应用，使矿业从机械化时代步入了信息时代。发达国家的实践表明，以现代科学技术为基础和手段的优化开采，能够为矿山企业带来巨大的经济效益。然而，我国的矿山企业仍然是几十年如一日，以陈旧的手工方法和经验决策为主指导和组织生产。如果说在矿山硬装备上我国与发达国家的差距是量的差距，那么在矿产开发中现代科学技术（尤其是软科学技术）的应用上，则是相差整整一个时代的质的差距。因此，实现优化开采是

我国矿业界的一项迫切任务。

优化的作用就是为矿山企业的管理和工程技术人员提供科学的决策支持和最优的生产方案及参数，以达到在有限的已知信息和一定的技术、经济条件下，最大限度地降低投资风险、提高投资收益率的目的。

露天开采在固态矿物开发中占有举足轻重的地位，其开采量占固态矿物开采总量的80%以上。露天矿的特点是生产规模大、投资多、投资风险大。一个露天开采项目的成败以及可获得的投资收益率的高低，在很大程度上取决于规划设计阶段和生产过程中，各类决策是否科学、生产方案和参数是否最佳。因此，国际上在矿山优化领域的研究从1960年代至今，以露天开采系统为主要研究对象，许多优化方法问世并在生产中得到不同程度的应用。

露天开采工程是一个高层次的复杂系统工程，在露天矿可行性研究及生产过程中，需要做出大大小小的决策，确定各种方案和众多参数。在需要优化的众多要素中，边界品位、最终开采境界、生产能力、开采顺序和开采寿命等要素，对露天开采的总体经济效益起决定性作用，也是露天开采优化研究的焦点。

上述五大要素不是相互独立的，而是存在着环状的相互作用关系，要获得全局最优解，就必须充分考虑这五大要素间的相互作用，实行“整体优化”。然而，露天开采整体优化是一个非常巨大而复杂的问题，过去的求解方法都是将这些要素独立看待，即在求某个（或某两个）要素的最优解时，假设其他要素为已知，这样的优化事实上只是一个问题的局部优化。露天开采整体优化至今没有得到较为满意的解决，成为矿山优化领域的一大难题。

笔者近十年来一直致力于露天开采整体优化的方法和应用研究，提出了露天开采整体优化定理，建立了优化模型，并开发了一整套优化算法，形成了较为完整的露天开采整体优化理论与方法体系。本书是笔者十年辛勤劳动的结晶，笔者衷心希望本书的出版能为我国露天矿实现优化开采，为我国矿业的可持续发展做出一点贡献。

科学研究是无止境的，一个科学问题往往是没有最终答案的，露天开采整体优化问题也是如此，它不会由于一个优化方法的出现得到最终解决，而是会随着科学技术发展和研究的不断深入，得到更满意的答案。笔者诚恳地希望学术界与工业界的读者以批评、挑剔的眼光阅读此书，提出不同的学术观点，甚至是不客气的批评。

本书的出版受到华夏英才基金的大力支持，在此表示衷心的感谢。徐小荷教授、牛成俊教授和任凤玉教授对本书的出版热情推荐，在此一并表示感谢。

谨以此书献给在矿业领域的科研和生产第一线辛勤耕耘的人们。

王 青 王智静

2000年4月

于沈阳东北大学

目 录

1 绪论	1
1.1 露天开采概述	1
1.1.1 露天开采境界及几何约束	1
1.1.2 露天开采时空发展程序	6
1.1.3 工作平盘宽度与工作帮坡角	9
1.1.4 分期开采	11
1.1.5 边界品位与品位-矿量曲线	16
1.2 块状矿床模型及几何约束的表述	17
1.3 露天开采在世界矿产开发中的地位及技术发展概况	19
1.3.1 露天开采生产规模及所占比重	19
1.3.2 露天矿装备技术水平	21
1.3.3 自动化及信息技术的应用	23
1.4 我国露天开采技术现状及其与国际水平的差距	25
1.4.1 开采规模及比重	25
1.4.2 开采工艺	25
1.4.3 装备技术水平	26
1.4.4 软科学技术的应用	27
1.5 露天开采优化在矿产开发中的作用及其研究内容	29
1.5.1 露天开采的特点和优化在露天开采中的作用	29
1.5.2 露天开采优化的研究内容	30
2 露天开采优化方法评述	33
2.1 块状矿床模型	33
2.2 最终开采境界优化	39
2.2.1 准优化方法	39
2.2.2 数学优化方法	41

2.2.3	储量参数化法	45
2.3	长期开采计划优化	47
2.3.1	试错法	47
2.3.2	数学优化方法	50
2.4	边界品位优化	56
3	露天开采整体优化问题	61
3.1	现有优化方法的局限性	61
3.2	露天开采整体优化问题的提出与定义	64
4	露天开采优化定理	66
4.1	定义与假设	66
4.2	从技术最优到经济最优——露天开采优化定理	69
5	露天开采优化数学模型	75
5.1	技术最优境界序列产生模型——储量参数化	75
5.1.1	储量参数化模型	75
5.1.2	缺口问题	79
5.2	开采方案优化模型——技术最优境界动态排序	81
5.3	技术最优境界动态排序的动态规划模型	87
5.4	技术最优境界动态排序的穷尽搜索模型	91
6	露天开采技术经济分析	97
6.1	成本分析与估算	97
6.1.1	基建投资	99
6.1.2	开采设备投资	104
6.1.3	生产成本	105
6.1.4	税后成本及其计算	107
6.2	矿山收入计算	109
6.3	采剥设备的生产能力	111
6.3.1	钻机生产能力	111
6.3.2	电铲生产能力	111
6.3.3	汽车生产能力	113

7	露天开采整体优化算法	115
7.1	技术最优境界序列的产生算法	115
7.1.1	境界的几何定界算法	116
7.1.2	境界的技术定界算法	119
7.1.3	技术最优境界序列的产生算法	124
7.1.4	下向锥的构造算法	134
7.2	技术最优境界动态排序算法	143
7.3	同时考虑边界品位的开采方案优化算法	151
7.3.1	边界品位系统分析算法	153
7.3.2	矿石采、选生产能力平衡法	155
8	工作帮坡与最终帮坡	163
8.1	最终境界已知条件下的开采方案优化	163
8.2	分期开采方案优化	167
9	露天开采方案优化实例	173
9.1	输入数据简介	173
9.1.1	品位块状模型	173
9.1.2	技术经济数据	174
9.2	技术最优境界序列的产生和结果对比	176
9.2.1	应用算法Ⅲ产生技术最优境界序列	177
9.2.2	应用储量参数化产生技术最优境界序列	179
9.2.3	两个境界序列的对比分析	186
9.3	开采方案优化结果及其分析	191
10	露天矿分期开采优化的境界-台阶动态排序法	209
10.1	露天矿分期开采问题	209
10.2	分期方案优化	211
10.3	分期开采中采场状态的数学表述	213
10.3.1	分期开采体	213
10.3.2	决策单元	214
10.3.3	采场状态	214

10.3.4	可行采场状态·····	217
10.3.5	前期状态与后续状态·····	219
10.4	可行采场状态的产生·····	219
10.4.1	可行采场状态总数·····	219
10.4.2	可行采场状态的产生算法·····	220
10.5	开采方案优化模型·····	223
10.5.1	品位-矿量和品位-金属量计算·····	223
10.5.2	境界-台阶动态排序模型·····	223
10.6	境界-台阶动态排序的动态规划算法·····	227
10.7	算例·····	235
10.7.1	输入数据·····	235
10.7.2	数据预处理·····	239
10.7.3	动态规划网络的形成与优化计算·····	239
10.7.4	优化结果·····	246
10.8	台阶的分区处理·····	247
参考文献·····		252

1 绪 论

在市场经济环境中，露天开采优化就是在给定的技术和经济条件下寻求经济效益最好的开采方案，它与露天开采的工艺和技术水平密切相关。本章首先对露天开采的有关概念和工艺过程作一概述；然后就国内外露天开采的技术发展与现状进行概括和对比；最后给出优化在现代露天生产中的作用以及露天开采优化的研究内容。本章是后续各章介绍的露天开采整体优化理论和方法体系的基础。

1.1 露天开采概述^[1]

本书提出的露天开采整体优化理论与方法体系是以露天开采境界和矿床开采顺序为框架的。本节对露天开采境界、露天开采时空发展程序、分期开采及边界品位等作一概述，并引入在后面章节中用到的有关概念。

1.1.1 露天开采境界及几何约束

完成一个矿床的地质勘探工作后，就可以依据探矿取样数据，应用某种估值方法，对矿床中矿物的品位进行估算，进而圈定出矿体并计算出矿石储量，这一储量称为“地质储量”。由于受到技术条件的制约和出于经济上的考虑，一般只有一部分地质储量的开采是技术上可行和经济上合理的，这部分储量称为“可采储量”。采用露天开采时，圈定可采储量的三维几何体称为“最终开采境界”，它是预计在矿山开采结束时形成的开挖体（即最终采场）的位置、大小与形状。图 1-1 所示是最终开采境界的平面投影和剖面示意图。

露天开采是以一定厚度的水平分层由地表逐层向下进行的，每一个分层称为一个“台阶”。台阶由坡顶面、坡底面和台阶坡面组成，坡顶面与台阶坡面的交线称为“坡顶线”；坡底面与台阶坡面的交线

称为“坡底线”。最终开采境界的边坡称为“最终帮坡”，由台阶组成，呈阶梯状。通过最上一个台阶的坡顶线和最下一个台阶的坡底线所做的假想平面与水平面的夹角，叫做“最终帮坡角”（图 1-1 中的 β_1 和 β_2 ）。

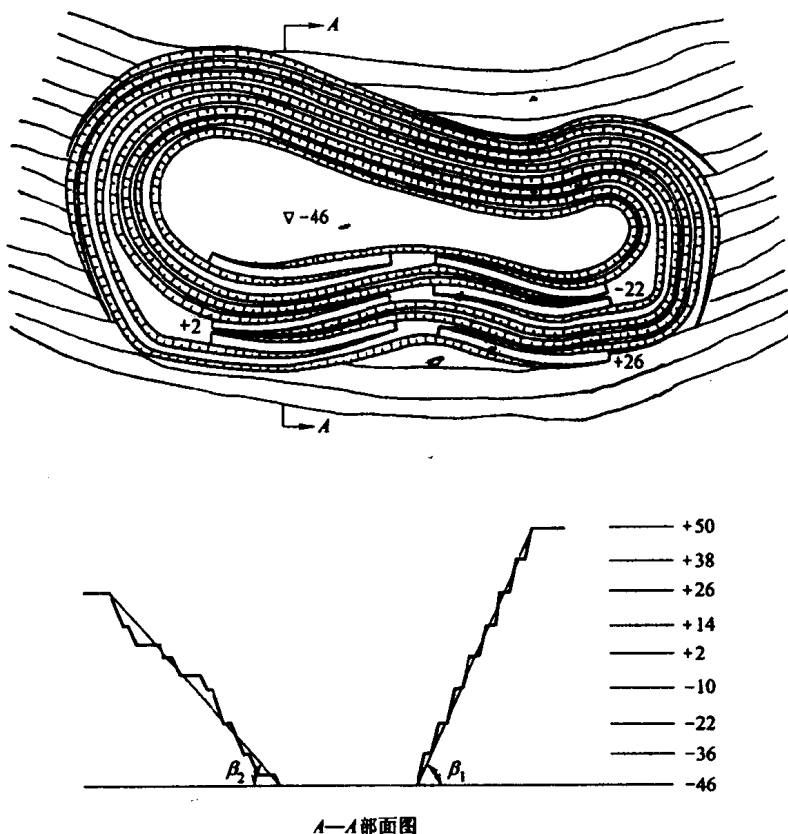


图 1-1 最终开采境界示意图

最终帮坡必须能够在较长的时期内保持稳定，不发生滑坡。这就要求最终帮坡角不超过一个最大值（一般为 $35^\circ \sim 50^\circ$ 之间），具体取值要根据岩体的稳定性确定。最大帮坡角对最终境界形态的约束，是确定最终境界及在开采中必须考虑的“几何约束”。

从充分利用矿物的角度来看，最终开采境界应包括尽可能多的地质储量。然而由于几何约束的存在，开采某部分矿石，必须在剥离该部分矿石上面一定范围的岩石后才能实现（图 1-2）。剥离岩石本身只能带来资金的消耗，不会带来经济收入。因此，从经济角度来看，存在一个使矿床开采经济效益最佳的最终开采境界。

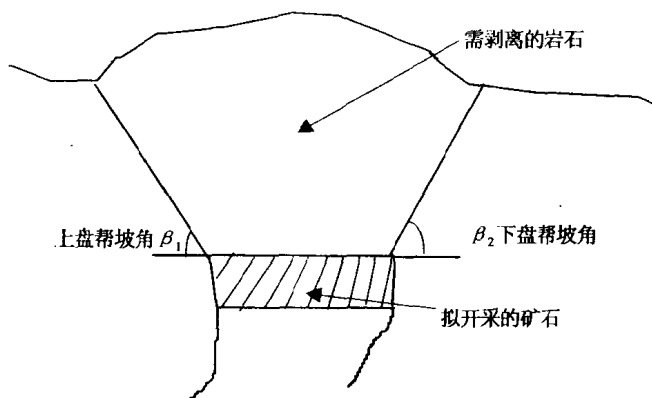


图 1-2 采矿与剥离关系示意图

确定最终开采境界的传统方法是手工法，其基本原理是境界剥采比等于经济合理剥采比。

图 1-3 是理想矿体的横剖面图。矿体与围岩之间有清晰的界线，矿体厚度为 t ，倾角为 45° ，矿体延深到很深。假设上、下盘最终帮坡角均为 45° 。那么，由于矿体倾角与最终帮坡角相等，矿岩下盘界线显然是剖面上最终境界的一个帮。若矿体的水平厚度 b 满足布置铲运设备所要求的最小宽度，最终境界底宽应该是 b 。在深度为 H 的水平上作一水平线，与矿体上、下盘界线分别相交于 A 、 B 点，从 A 点向上以 45° 角（帮坡角）作直线与地表相交于 C 点， $CABD$ 围成该剖面上的一个最终境界。境界内岩石总量为 W ，矿石总量为 O ， W 与 O 之比称为“平均剥采比”，用 R_a 表示。

$$R_i = \frac{CA}{AB} \quad (1-3)$$

设矿山企业的最终产品为精矿，矿体的地质品位为 g_o ，精矿品位为 g_p ，其售价为 q ；单位剥岩成本为 C_w ，单位采矿成本为 C_m ，单位选矿成本为 C_p ，采选综合回收率为 r ，那么，不考虑矿石的贫化时，采出增量 dW 和 dO 带来的利润增值(dP)的计算如下：

$$dP = \frac{dO g_o r q}{g_p} - C_w dW - C_m dO - C_p dO \quad (1-4)$$

$$\frac{dP}{dO} = \frac{g_o r q}{g_p} - C_w R_i - (C_m + C_p) \quad (1-5)$$

从上式可以看出，利润增量随境界剥采比的增加而减小（因为需要花费更多的剥岩费用）。从图 1-4 可知，对于给定的 dH ， dO 不变（因为矿体厚度不变）， dW 随着深度 H 的增加而增加。也就是说，境界剥采比随境界深度而增加。因此，利润增量 dP/dO 随境界深度的增加而减小。只要利润增量大于零，就应开采 dW 和 dO ，因为这样会使总利润 P 增加。当利润增加为零时，总利润达到最大值，这时的境界即为最佳境界。利润增量为零时的境界剥采比称为“盈亏平衡剥采比” (Breakeven stripping ratio) 或“经济合理剥采比”，用 R_b 表示。

$$R_b = \frac{\frac{g_o r q}{g_p} - (C_m + C_p)}{C_w} \quad (1-6)$$

因此，传统方法中确定最终境界的准则是境界剥采比等于经济合理剥采比。将境界位置上下移动，根据式 (1-3) 计算每次移动后的境界剥采比，直到它等于经济合理剥采比为止，就找到了最佳境界。这就是手工法境界设计的基本原理。

从式 (1-6) 可知，经济合理剥采比不依赖于境界的大小和几何形状，只依赖于回收率与成本、价格等技术经济参数，其值可以通过市场与成本分析得出。式(1-6)不是计算经济合理剥采比的通用公式，而是简化了的示意性公式。最终产品和成本构成不同，计算经济合理

剥采比的公式也不同，必须根据矿山的具体情况进行计算。

1.1.2 露天开采时空发展程序

从原始地表开始到开采完毕形成最终开采境界，露天开采的过程是一个使开采区域内的地貌连续发生变化的过程。如前所述，露天开采是以台阶为单位逐层进行的。掘沟是一个新台阶开采的开始，为一个新台阶的开采提供了运输通道和初始作业空间。沟一般由出入沟和段沟组成，前者为台阶之间建立运输联系，后者为开采提供初始作业空间。完成掘沟后，即可开始台阶的侧向推进。采用汽车运输时，由

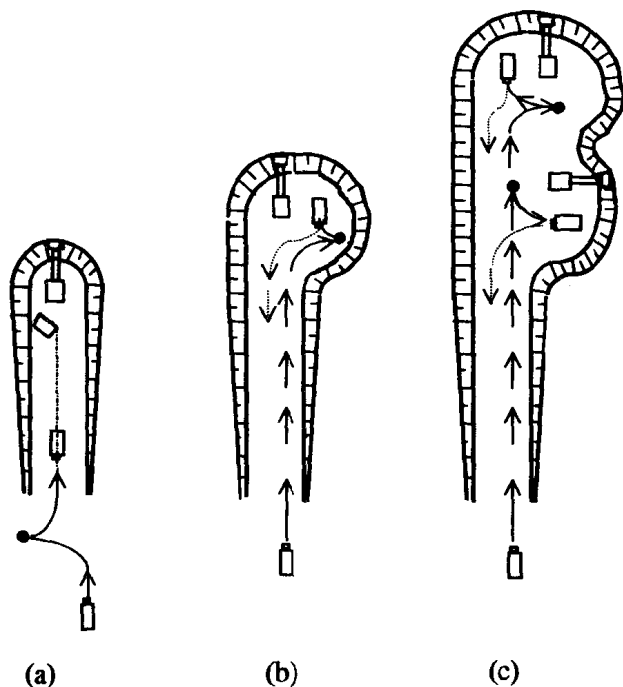


图 1-5 台阶推进示意图

于其灵活性高，有时在掘完出入沟后不开段沟，立即以扇形工作面形式向外推进。如图 1-5 所示，刚完成掘沟时，沟内的作业空间非常有限，汽车须在沟口外进行调车，倒入沟内装车（图 1-5a）；当在沟底

采出足够的空间时,汽车可直接开到工作面进行调车(图 1-5b);随着工作面的不断推进,作业空间不断扩大,如果需要加大开采强度,可在一定时候布置两台采掘设备同时作业(图 1-5c)。

一个台阶的水平推进使其所在水平的采场不断扩大,并为其下面台阶的开采创造条件。新台阶工作面的拉开使采场得以延深。台阶的水平推进和新水平的拉开构成了露天采场的扩展与延深。

假设一露天矿最终境界内的地表地形较为平坦,地表标高为 200m,台阶高度为 12m。图 1-6 是该露天矿扩延过程示意图。首先在地表境界线的一端,沿矿体走向掘沟到 188m 水平(图 1-6a)。出入沟掘完后,在沟底以扇形工作面推进(图 1-6b)。当 188m 水平被揭露出足够面积时,向 176 m 水平掘沟,掘沟位置仍在右侧最终边帮(图 1-6c)。之后,形成了 188~200m 台阶和 176~188m 台阶同时推进的局面(图 1-6d)。随着开采的进行,新的工作台阶不断投入生产,上部一些台阶推进到最终边帮(即已靠帮)。若干年后,采场现状变为如图 1-6e 所示。当整个矿山开采完毕时,便形成了如图 1-6f 所示的最终境界。

