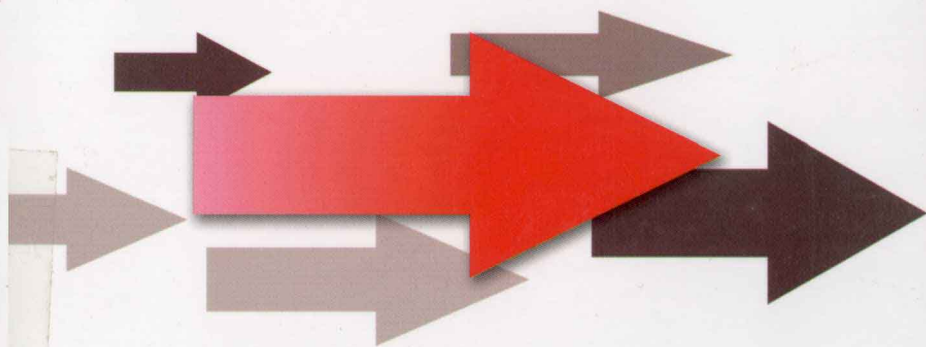


地下开采边界品位 动态优化研究及其应用

初道忠 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

地下开采边界品位动态 优化研究及其应用

初道忠 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2011

内 容 提 要

在矿山开采过程中,边界品位是最基本、最重要的参数之一,因为它影响到整个矿山的经济效益,所以边界品位的优化一直是矿山主要的研究课题。

本书介绍了地下开采边界品位优化的动态规划法;最大现值法确定地下开采边界品位;谦比西铜矿生产概述和铜矿边界品位优化。

本书建立的边界品位动态优化模型较好地解决了边界品位在时间和空间上的结合问题,同时对经典的最大现值法(即 Lane 法,针对露天开采)推导出了地下开采情况下的优化模型。并开发相应的软件系统,系统在赞比亚谦比西铜矿进行了应用。

本书适合矿业工程学科的本科生、研究生以及矿山的工程技术人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

地下开采边界品位动态优化研究及其应用/初道忠著.

—北京:冶金工业出版社,2011.1

ISBN 978-7-5024-5430-2

I. ①地… II. ①初… III. ①铜矿床—地下开采—研究 IV. ①TD862.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 233449 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨盈园 美术编辑 张媛媛 版式设计 葛新霞

责任校对 石 静 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5430-2

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2011 年 1 月第 1 版, 2011 年 1 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 6.375 印张; 169 千字; 193 页

22.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

矿产资源是地球赋予人类的财富，是人类赖以生存发展的物质基础，在经济建设和社会发展中起着重要的作用。而矿产资源的不可再生性和稀缺性，使之如何在有限的资源条件下实现社会和经济的可持续发展，是当今世界面临的一个重大课题。要实现矿业可持续发展，一是在宏观上以科学决策为基础实现对行业的调控；二是在微观上以现代科学技术为基础和手段实现矿山的优化开采。

优化是科学研究、工程技术和经济管理等领域的重要研究工具。它所研究的问题是讨论在众多的方案中寻找最优方案。在矿山企业中，要选取最优的技术经济参数，既能充分利用现有的矿产资源，又能获得好的经济效益。同时，由于不同矿床的赋存条件各不相同，同一矿床不同区位的技术指标也有差别，所以最优方案的参数确定也不是固定不变的，它将随着矿床技术指标的变化而动态变化。

随着现代工业的高速发展，对矿产品的需求日益增长，开采深度逐渐加深，技术难度日益增大。部分露天开采也可能陆续转化为地下开采。因此，在未来的年代里，地下开采比重将逐渐增大，开采地下矿山在整个矿山开采中的地位将越来越重要。

在矿山开采过程中，边界品位是最基本、最重要的参数之一，因为它影响到整个矿山的经济效益。从20世纪60年代以来，边界品位的优化一直是矿山主要的研究课题。同时，地下开采边界品位的优化是一个复杂的工程经济管理和决策问题，涉及各种自然、技术和经济因素。边界品位优化涉及品位空间分布、采矿方法、矿山开采能力、开采顺序以及技

术经济参数等诸多因素，它们之间不是相互独立的，而是存在着环式的相互作用、相互制约的关系。如果能够科学地考虑上述各种因素，就可以较好地解决地下开采边界品位优化问题。

本书以总净现值最大为目标，结合地下开采矿山实际，建立一个新的边界品位动态优化模型。该模型能够考虑使用的采矿方法、矿体的开采顺序、矿石品位在不同区段的实际分布以及矿山年生产能力，用来指导矿山中、长期的经济决策和短期的实际生产。

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，边界品位的优化问题也是如此，它不会因一个优化方法的出现而得到最终解决，随着科学技术发展和研究的不断深入，将得到更满意的答案。由于笔者水平有限，本书如存在一些不足之处，希望能得到读者的批评指正，更希望本书对以后在该领域的研究起到抛砖引玉的作用。

本书的出版受到山东理工大学的大力资助，在此表示衷心的感谢。该书是在国际合作项目“赞比亚谦比西铜矿高效采矿方法研究”子项目“经济技术指标优化研究”的基础上撰写的，在写作过程中，东北大学王青教授提出了许多宝贵的建议；同时，赞比亚谦比西铜矿的有关人员给予了大力的支持，提供了大量的宝贵资料；在此一并表示感谢。

作 者

2010年5月

于山东理工大学

目 录

1 绪论	1
1.1 边界品位及其对矿山生产的影响	1
1.1.1 边界品位的定义	1
1.1.2 边界品位对整个生产过程的影响及与其他 重要参数的关系	3
1.2 边界品位研究现状及方法	7
1.2.1 国外对边界品位的研究现状及方法	7
1.2.2 我国对品位指标的研究现状及方法	13
1.3 问题的定义	17
1.3.1 边界品位研究中存在的主要问题	17
1.3.2 地下开采边界品位优化问题的提出与定义	18
2 地下开采边界品位优化的动态规划法	21
2.1 动态规划问题的基本概念及建模思路	22
2.1.1 阶段	22
2.1.2 状态	22
2.1.3 决策	22
2.1.4 策略和子策略	23
2.1.5 状态转移方程	23
2.1.6 指标函数	23
2.2 动态规划优化法确定最佳边界品位	23
2.2.1 最优边界品位的确定思路	23
2.2.2 变量定义	26
2.2.3 动态规划边界品位优化模型	27
2.2.4 实际问题的处理	30

2.2.5	边界品位动态规划法的算法步骤和流程	36
2.3	品位优化的成本分析	40
2.3.1	可变成本的构成	40
2.3.2	不变成本的构成	41
2.4	无后效应	41
2.5	算例	43
2.5.1	品位段和步长	44
2.5.2	矿量增量	45
2.5.3	边界品位优化计算	48
2.5.4	边界品位优化结果	56
3	最大现值法确定地下开采边界品位	58
3.1	矿量计算和平均品位	59
3.2	采矿、选矿两阶段边界品位的数学模型	61
3.2.1	赢利及现值计算	61
3.2.2	不同阶段生产能力约束下的最佳边界品位	62
3.2.3	生产能力平衡条件下的边界品位	65
3.2.4	最佳边界品位	66
3.2.5	算法步骤和流程	68
3.3	采、选、冶三阶段边界品位的数学模型	70
3.3.1	赢利及现值计算	70
3.3.2	不同阶段生产能力约束下的最佳边界品位	71
3.3.3	生产能力平衡条件下的边界品位	75
3.3.4	最佳边界品位	76
3.3.5	算法步骤和流程	77
4	谦比西铜矿生产概述	81
4.1	矿山概况	81
4.1.1	地理位置	81
4.1.2	生产现状	82

4.2 矿床地质	83
4.2.1 矿区地层	84
4.2.2 矿区构造	86
4.2.3 矿区水文地质条件	87
4.2.4 矿体特征	88
4.3 探矿工程布置、取样	91
4.3.1 基建期探矿	91
4.3.2 生产期探矿	93
4.3.3 取样数据	94
4.3.4 矿体品位变化趋势	95
4.4 主采区开拓及采矿方法	95
4.4.1 开采范围	95
4.4.2 矿床开采技术条件	96
4.4.3 采矿方法	98
4.4.4 回采工艺	103
4.4.5 开拓运输系统	109
4.5 谦比西铜矿成本及价格分析	112
4.5.1 可变成本	112
4.5.2 不变成本	118
4.5.3 铜精矿价格	118
5 谦比西铜矿边界品位优化	120
5.1 动态规划法对边界品位的优化	121
5.1.1 优化单元的确定	121
5.1.2 优化单元的品位分布	122
5.1.3 优化单元的边界品位—矿量曲线	126
5.1.4 动态规划优化法对边界品位优化的计算	132
5.2 最大现值法对边界品位的优化	138
5.2.1 优化对象的品位分布及边界品位—矿量 曲线	138

5.2.2 边界品位优化结果	140
5.2.3 现值法优化的主要局限性	141
5.3 两种优化结果的比较	141
6 结论与展望	144
附 录	147
附录 1 最终产品分别为精矿和金属时产量的 推导过程	147
附录 2 动态规划边界品位优化系统 (DPOS1.0) 简介	148
附录 3 矿山经济决策系统 (MEDS1.0) 简介	150
附 3.1 原始数据输入	151
附 3.2 系统功能模块	153
附 3.3 结果输出	154
附 3.4 其他功能介绍	155
附 3.5 系统特点	156
附录 4 第 5 章案例: 有效决策集合 (部分)	157
参考文献	189

1

绪 论

在矿山开采过程中，边界品位是最基本、最重要的参数之一。边界品位的选择直接影响所圈定矿体的形态及矿石储量，进而影响矿山建设、生产规模、收益、设备选择和生产寿命，同时还影响到不可再生资源的利用率。因此，边界品位是一个对矿山经济效益和社会效益有着重大影响的技术经济参数。边界品位的优化，也是矿山经营参数优化的核心内容之一。

1.1 边界品位及其对矿山生产的影响

1.1.1 边界品位的定义

边界品位作为指导矿床开采活动的主要技术经济参数，它本身的含义就必须很明确。Montimer, Musgrove 和 Krige 等人

最初在此方面做了大量的研讨，讨论的焦点是围绕着开采矿石所获收益对于它相应的开采加工成本的补偿问题而展开的。Montimer 在这一问题的表述非常具有代表性，他认为：采出矿石的平均品位必须保证每吨入选矿石获得既定的利润下限，而最低品位应能抵偿它本身的费用。这一简洁的思路，至今在许多矿山的开采实践中得以体现。后来 Erickson 定义的边界品位为开采、加工和销售过程中得到一定可接受利润的最低品位，并由此导出了“利润成本”和“净现值”两个概念。1972 年 Taylor 进一步将边界品位分为“计划”和“作业”两种，前者指勘探期及生产前期各阶段用来确定矿体的空间范围和总储量的品位指标，是用经验计算式类比而得；后者却是生产期内各短期用来选定开采对象和确定入选矿石的品位，他给出了边界品位的定义是：“为某种特定原因区分两种行为取向的品位值，即区分采与不采，采出后送往选厂还是排弃的品位值……”

与国外所采用的单指标即边界品位不同的是，我国长期以来采用的是双指标体系，即用边界品位和最低工业品位来圈定矿体，同时以其他一些非品位性指标相辅助。边界品位，即矿石与围岩的分界品位，是圈定矿体的单个样品有用组分含量的最低要求。它可以使包括在圈定矿体中的贫、富矿石平均起来满足最低工业品位的要求。边界品位介于最低工业品位和尾矿品位之间。最低工业品位，也称最低可采品位，是在计算储量的既定块段中，能保证偿还开采和加工有用矿物全部费用和取得最低利润的有用组分的极限含量，它是区分能利用储量（表内储量）和暂不能利用储量（表外储量）的分界品位。其他辅助指标包括最低可采厚度、夹石剔除厚度等。

与国内的品位指标研究相比较，国外的品位指标研究有以下两个特点：

一是在当前条件下，区分矿与非矿的标准只有一个，即边界品位。而国内采用双指标体系：边界品位和最低工业品位。

二是品位指标的使用比较灵活，随着市场、成本等技术经济条件的变化，边界品位也作相应变化，以使矿山企业获得最大的利润。而国内品位指标一旦确定就很少改动。

1.1.2 边界品位对整个生产过程的影响及与其他重要参数的关系

边界品位是用于区分矿石与废石的临界品位值，矿床中高于边界品位的部分是矿石，低于边界品位的是废石。很显然，如果把边界品位确定得太高，那么判定为矿石的部分就会变少，这样势必造成一些能够带来利润的部分矿石损失，不能达到矿山整体效益最好，同时，矿产资源也得不到有效利用；如果边界品位定得过低，矿石量变大，在开采能力一定的情况下，每年获得的金属量变小，而且现金流分布在很长的寿命期内，经折现之后，其净现值大为减少，这样也导致非经济性。因此，边界品位优化研究的最基本问题，就是要选择最优的边界品位，使矿山生产的效益最大化。

同时，边界品位的确定贯穿在整个矿业开发过程。在勘探阶段，随着工程投入的逐步展开，从踏勘到详细勘探，最后必须依照品位指标进行圈定矿体范围，从而得到矿体的形态和规模。在设计阶段，地质、采矿、选矿等多方面都做了深入的调查、实际研究，这些都是在采用较严谨的数学模型方法来优化品位指标的前提下进行的。在生产运营阶段，矿山所面临的经济技术参数，如成本、回收率和市场价格等都是现实的，矿山必须根据实际经营参数，对品位指标进行必要的调整，从而使矿山的总体效益最佳。

矿山边界品位指标的确定是一项非常复杂的工作，综合性很强，涉及到各种自然、技术、经济因素。下面分别介绍边界品位与开采方法、矿山生产能力、选矿回收率、矿床品位分布、矿石单位成本和产品销售价格等主要的技术经济参数的关系。

1.1.2.1 采矿方法

固体矿产的开采一般分为露天开采和地下开采。露天开采时，先对覆盖在矿体的岩层进行剥离，然后将矿体划分为许多水平分层（台阶），自上而下逐层开采。地下开采时，从地面开掘一系列井巷通达矿体，将矿体划分为若干个阶段，按照情况选择适合的顺序开采。就地下开采而言，采矿方法的选择与矿体产状（指矿体的倾角、厚度和形状等）有关，矿体的倾角主要影响矿石在采场内的搬运方法，而且倾角的影响还与厚度有关。矿体的厚度影响采矿方法和落矿方法的选择以及矿块的布置方式，矿体形状和矿石与围岩的接触情况也影响采矿方法的选择，如接触面不明显，矿体形状又不规则，不同的采矿方法会引起较大的矿石损失和贫化。边界品位的选择直接影响着矿体的产状，从而也影响采矿方法的选择。对于露天开采，因为盈亏平衡剥采比是地质品位的函数，当矿床的品位变化大时（如贵金属与有色金属矿床），境界线的位置不同，其穿越的矿体品位有较大差别。这种情况下，就不应采用一成不变的盈亏平衡剥采比进行境界设计，而应采用与境界线穿越的矿体部位的品位所对应的盈亏平衡剥采比。品位和盈亏平衡剥采比的关系可由公式求得。在实践中为方便起见，常常将这一关系绘成直线。从经济意义上讲，这一直线表明了具有某一边界品位的矿石可以“支持”的剥岩量。通过边界品位确定的盈亏平衡剥采比，可以进一步确定露天矿的最终境界，从而选择合理的开采方法。

1.1.2.2 矿山生产能力

通过边界品位与矿量的关系曲线可知，边界品位和矿量是呈递减的关系。边界品位的确定决定着矿石量的多少，也就是矿山规模的大小。矿山生产能力的影响因素除了市场需求和最佳的经济效益外，主要受矿山规模的影响。在此基础上，Taylor

在《矿山价值及可行性研究》一文中提出在西方工业水平和管理条件下, 矿石储量、生产能力和服务年限三者相互关系的经验公式如下:

$$A = 5R^{\frac{3}{4}} \quad \text{或} \quad T = 0.2R^{\frac{1}{4}} \quad (1-1)$$

式中 A ——矿山生产能力, t/a ;

T ——矿山合理服务年限, a ;

R ——保有的矿石工业储量, t 。

根据我国目前实际情况, 矿山服务年限与储量的关系, 式(1-1)经验公式调整如下:

$$A = 1.25R^{\frac{4}{5}} \quad \text{或} \quad T = 0.8R^{\frac{1}{5}} \quad (1-2)$$

式(1-2)中的参数意义同式(1-1)。

1.1.2.3 选矿回收率

矿山企业的收益, 与矿石选别后取得的金属量密切相关, 而在矿石数量一定的情况下, 金属产量取决于选矿的金属回收率。从选矿理论中可知, 对于可选性相同的矿石来说, 入选品位越高, 选矿的回收率越高, 反之入选品位降低, 选矿的回收率降低, 这种升降关系有一定的规律, 可以用数理统计方法, 来描述这一规律。

1.1.2.4 矿床品位分布

运用数理统计的方法, 可以得到各种品位级别的样品点出现频率, 从而得到矿床品位分布函数。品位分布函数对边界品位确定具有非常重要的意义。对于一个矿山来说, 如果矿床中各处的品位差异不大, 那么边界品位的确定问题就变得比较简单。而事实上, 由于有用矿物分布在不同品位级别上, 当不同的品位指标去圈定矿体, 就会得到不同的矿石量。如果矿石开采边界品位减小, 矿石量就会增加, 平均品位却下降, 从而影响矿山的生产效益, 其影响程度如何, 就取决于矿床的品位分

布规律。矿床的品位分布函数的建立是边界品位优化分析的重要基础之一。

矿床的形成是一个非常复杂的自然过程，其品位分布形态并不是严格地符合某种数学函数。但矿床品位分布在统计上往往符合一定的函数形式，主要有正态分布、对数正态分布和负指数分布三种分布。在边界品位确定的情况下，品位分布影响矿体的产状，如矿体的形状、厚度和倾角等。

1.1.2.5 矿石单位成本

矿石单位成本是指生产每吨矿产品所支付的费用总和。按产品的类别，又可分为矿石成本和精矿成本。矿石成本包括矿石开采过程中所发生的全部费用。以矿石为最终产品的矿山应计算到成品矿仓为止，采选联合企业则应计算到选厂原矿仓为止；精矿成本是生产一吨精矿产品所投入的全部费用。单位成本按与产量的关系可分为不变成本和可变成本。不变成本是在生产能力一经形成，不管其利用程度如何，有关费用照样发生，如排水、维护及车间经费、企业管理费等。而可变成本是随矿产品产量的增减而变动的成本。单位成本影响边界品位的确定，单位成本越高，按盈亏平衡原则，边界品位越大。

1.1.2.6 产品销售价格

价格是矿石开采品位指标经济分析的重要因素，一定品位矿石开采加工后效益如何，很大程度是取决于价格的高低，然而在大多数分析研究中，人们都把价格作为一个常数来处理。在以往的计划经济体制条件下，产品由国家制定调拨价格并长期保持不变，这种做法尚有一定的合理性；但是在市场经济条件下，价格经常变动，这就需把价格当作一个变量来处理，在不同的条件下，采用不同的价格。所以价格的市场预测是在矿山经济决策过程中的一个重要步骤。预测的目的在于分析矿产市场经济变量间相互关系及影响因素、评估因素的变化对市

场的潜在作用以及预测矿产市场的未来状态。

关于产品销售价格对边界品位的影响,有两种截然不同的观点:一种是按照传统的盈亏平衡法的理论和计算方法,产品销售价格降低,边界品位增大,产品销售价格提高,边界品位减小。对此,可以理解为当产品销售价格高时,降低边界品位,从而可以开采低价时不能开采的矿石;在价格较低时,则应该相应地提高边界品位,以保证开采的矿石能够赢利。另一种观点是,高价采高品位矿石,低价采低品位矿石。我们知道,最大的销售收入来自于在高价时期尽可能地多销售产品。矿山总的矿量是有限的,在高价时期销售掉的产品所占的比重越大,整个矿山的销售收入就越高,而矿山每年采矿和选矿能力是有限的,因此,在价格高的年份里,要增加产品销售量,不是经过加大处理量,而是通过提高所处理矿石的边界品位来实现,这样才能达到利润最大化。Taylor 曾对这一观点用数学式进行近似的证明:假设矿山选矿生产能力为 C , 选矿回收率为 λ , 第一年金属价格为 s_1 , 第二年为 s_2 , 并且 $s_1 > s_2$, 采矿品位有两种选择 g_1 、 g_2 , 且 $g_1 > g_2$ 。可得:当第一年采矿品位为 g_1 , 第二年采矿品位为 g_2 时, 两年的总收益为 $P_1 = (g_1 \lambda s_1 + g_2 \lambda s_2) C$; 当第一年采矿品位为 g_2 , 第二年采矿品位为 g_1 时, 两年的总收益为 $P_2 = (g_2 \lambda s_1 + g_1 \lambda s_2) C$ 。因为 $g_1 > g_2$ 、 $s_1 > s_2$, 所以 $\Delta P = P_1 - P_2 > 0$, 即 $P_1 > P_2$ 。由此得出,在高价时开采高品位矿石,低价时开采低品位矿石情况下,得到的收益较大。

1.2 边界品位研究现状及方法

1.2.1 国外对边界品位的研究现状及方法

1.2.1.1 国外对边界品位的研究现状

边界品位作为矿山开采一个非常重要的技术经济参数,国外(主要指西方国家)在市场经济机制下,以经济效益为目标,

对品位问题的研究起步也较早，并取得了显著的成果。下面对西方在边界品位上的研究发展，根据经济分析的典型特征进行历史分期作以评述：

20 世纪 60 年代以前，矿山企业边界品位指标确定的方法主要是用传统的盈亏平衡法。也就是使矿物带来的收益与其生产过程发生的费用相等时的品位，高于该品位的部分是可以带来赢利的作为矿石，开采并送往选厂处理或直接出售；低于该品位的是没有带来赢利的不予开采或开采后送往废石场。该方法没有考虑资金的时间价值。早在 1914 年，Gary 就系统地提出了矿山最佳生产理论，其中定性地涉及边界品位的概念及问题，边界品位最初应用于南非的 Witwatersrand 金矿。1918 年，经济学家 G·卡塞尔在他的《社会经济原理》中提出：计算矿石总量的价值要引入折现的方法。H. D. 霍斯尔德也提出，估计矿石储量价值要考虑资金的时间价值。1922 年，Berry 首先提出要用净现值来计算边界品位。这个时期，人们已经认识到资金时间价值的引入，尽管还没有用到边界品位的计算当中，但这些早期的思想对矿石品位指标的研究极富有启发性，其影响非常深刻。

20 世纪 60 ~ 90 年代初，边界品位的优化研究从理论上说已经达到一定的高度，其分析内容上也考虑了诸多的影响因素，在逻辑分析上，更具系统性。这一时期研究的显著特点是将品位分布、资金时间价值、各种生产能力等，统一纳入边界品位分析的框架中。这段时期，有三位研究者显得非常突出。

Henning U. 首次对 Berry 所述的用单一值的动态盈亏平衡品位指标来指导整个矿山服务年限内的开采活动的做法提出质疑。他认为，为使矿山开采的净现值达到最大化，必须在整个开采时期不断地调整最优边界品位，而这一指标系列是逐步递减的，他用一个数值案例证明了这一点。他所分析的案例是以地下开采为研究对象，所做的成本分析也较简单。

Lane 是近 40 年来西方国家在边界品位经济优化研究中具有