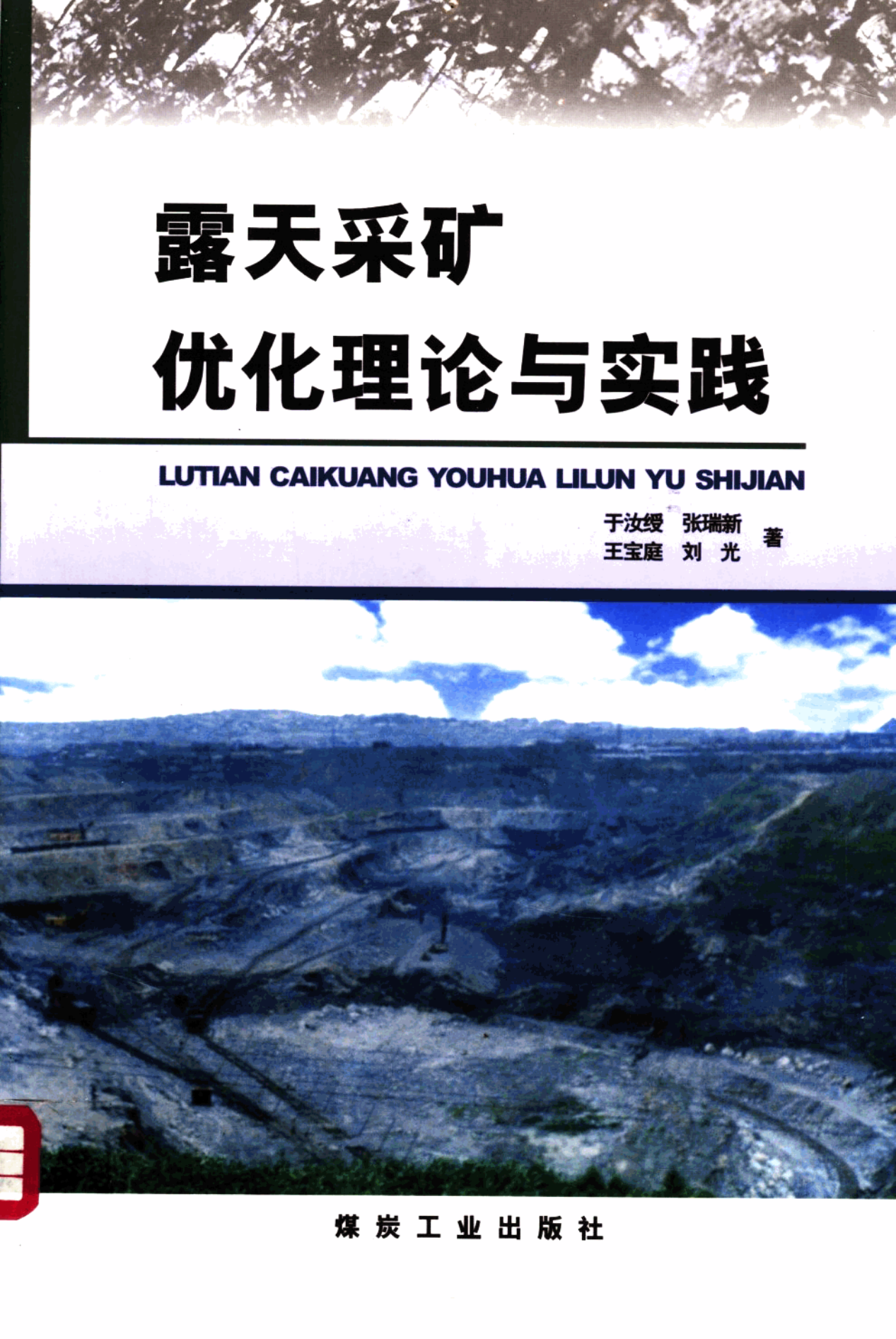




露天采矿 优化理论与实践

LUTIAN CAIKUANG YOUHUA LILUN YU SHIJIAN

于汝绶 张瑞新 著
王宝庭 刘 光

煤炭工业出版社

露天采矿优化理论与实践

于汝绶 张瑞新 王宝庭 刘光 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

这本专著凝聚了两代露天采矿人的心血,是对近 20 余年来中国露天煤矿开发中科研、教学、设计、生产与管理的优化理论成果与应用实践的总结。内容联系实际,突出实用,包括:矿床地质模型与地质资源评价、露天煤田开发优序决策、露天矿开采境界与设计规模确定、采运设备及系统能力评价、露天矿生产工艺系统的优化、露天矿主要设备的选型与配套、露天矿开采程序的优化、排土场及排弃物流向流量的优化、露天矿剥采计划的优化和露天矿设计优化的评价。本书读者对象为矿业界从事规划、设计、科研、生产经营与管理的人员及矿业院校的师生。

图书在版编目(CIP)数据

露天采矿优化理论与实践 / 于汝绶等著. —北京: 煤炭工业出版社, 2005

ISBN 7-5020-2491-3

I. 露… II. 于… III. 露天开采: 煤矿开采—最优
化方法—研究 IV. TD824

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 063078 号

煤炭工业出版社 出版发行
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
煤炭工业出版社印刷厂 印刷

*
开本 787mm×1092mm¹/₁₆ 印张 17³/₄ 插页 2
字数 417 千字 印数 1—2,000
2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月第 1 次印刷
社内编号 5262 定价 68.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换



于汝绶

1931年8月出生，江苏金坛人。1952年毕业于北京矿业学院采矿系，1956年研究生毕业，留校任教。1959年调昆明煤矿设计研究院任技术员、工程师。1979年任中国矿业大学副教授、教授。1990~2000年任徐州市政府咨询委员会第二、三、四届主任委员。1992年享受国务院政府特殊津贴。

1956年起参与创建我国高校露天采矿专业，为创建人之一，先后培养了十余名研究生和数百名露天采矿专业人才。参与十余座矿山的设计、施工、咨询、评估。发表论文30余篇，主要著述有：《露天采矿学》(合编)、《露天矿设计理论分析》(自编)、《采矿工程》(合编)、《中国煤矿开拓系统》。1984年以来，完成多项科研成果，其中《我国露天煤矿现状调查与规划建议》获露天矿研讨会一等奖、《特大煤田露天开发研究》获1990年国家教委理论成果二等奖、《露天开采设计规划综合优化的理论与实践》先后获1991年原能源部科技进步一等奖和1992年国家科技进步二等奖、《徐州市经济社会发展模型(1990~2010年)》获1991年江苏省哲学社会科学优秀成果二等奖。



张瑞新

教授、博士，1964年12月出生于内蒙古自治区固阳县。分别于1985、1988和1993年获中国矿业大学学士、硕士和博士学位。现任煤炭工业通信信息中心、国家安全生产监督管理局、国家煤矿安全监察局通信信息中心副主任，主要负责国家安全生产信息化和煤炭工业信息化工作，兼任中国矿业大学(北京)教授、博导。

先后在中国矿业大学、中国矿业大学(北京)、印尼PT. Bukit Sunur公司和英国诺丁汉大学从事采矿工程、安全工程、信息技术和计算机应用研究、教学和管理等工作。主持或作为主要参加者完成40余项科研项目，其中4项获国家级、部级奖，发表学术论文70余篇。曾任中国矿业大学(北京校区)信息处理与研究中心主任、煤炭工业通信信息中心主任助理。

1994年获国务院政府特殊津贴，1997年获孙越崎青年科技奖，1997年成为中国矿业大学国家重点学科后备学术带头人，2003年获国家安全生产监督管理局(国家煤矿安全监察局)机关党委“十佳青年”称号。

序

这本专著是两代露天采矿人辛勤劳动的结晶。我国的露天采矿是借改革开放的春风得以长足发展的。二十余年来露天煤矿引进了多种先进的采矿工艺，积累了丰富的开发实践经验，既催生了科研、设计、建设和生产的优化理论成果，也经历了多元化露天生产的实践检验。

于汝绶教授从建国初期就投身于露天采矿事业，是我国露天采矿界的先驱之一，他的足迹遍及国内所有的露天煤矿和一些其他矿山。经过他及其弟子们两代人的跋涉和探索，逐渐形成了关于露天采矿的新理论和新观点。这本专著就是对露天采矿创新理论的归纳和总结，如提出露天煤田开发优序决策评价体系，用当量经济剥采比作圈定境界的准则，以“不饱和规模”作为露天矿的设计规模，提出电铲卡车工艺条件下优化工作线长度的理论，用“剥离运输功均衡法”安排剥采计划等等。这些对于露天矿设计和生产都是很有价值的，是实用性较强的理论和方法。

作者们的艰辛努力和求实精神，必将成为露天采矿事业的宝贵财富，从而推动我国露天采矿事业的不断发展。在强调安全生产和科学发展观的今天，这本体现科学探索精神专著的出版物，弥足珍贵，值得庆贺。

赵铁锤

国家煤矿安全监察局局长

2005年3月31日

前言

20世纪以来,全球露天开采业发展迅速,露天采煤产量持续增长,从1913年的90 Mt(占6.7%)增长到1990年的1.743 Gt(占42.8%)。许多产煤大国都把发展露天采煤作为重点,如印度、南非、波兰、印尼和澳大利亚等,其中印度和南非成效最大,印度在1980~1995年的15年间,露天采煤增长了179.2 Mt,使露天采煤比重提高到71%。1995年南非露天采煤量已超过矿井采煤量,占53%。露天采煤量超过矿井产煤量的主要产煤国家有德国、澳大利亚、印度、美国、俄罗斯和南非。预计未来露天采煤产量仍将保持增长态势,但增速将减缓。

我国露天煤矿主要是新中国成立之后发展起来的。20世纪50~60年代兴建了阜新海州、抚顺西、阜新高邱、平庄西、鹤岗岭北、扎赉诺尔灵泉、哈密三道岭、石炭井大峰、义马北、铜川焦坪、云南小龙潭、可保、吕合等露天煤矿,但规模普遍较小。1965年,全国国有重点露天煤矿产量仅4.22 Mt,占全国国有重点煤矿总产量的2.7%。1980年,建成0.3 Mt/a以上的露天煤矿18处,国有重点露天煤矿产量达14.03 Mt,占全国国有重点煤矿总产量的4.07%。这一时期建成的露天煤矿受“大跃进”和十年动乱的影响,先天不足,后天失调,但毕竟为我国的露天开采事业打下了初步的基础。

我国露天煤矿大发展是和改革开放相联系的。1981年国家提出尽快开发大露天的方针,决定开发霍林河、伊敏、元宝山、准格尔和平朔五大露天煤矿,并积极引进美国、德国、俄罗斯等国的先进技术,委托国外大公司编制设计,露天煤矿发展缓慢的局面很快改观。1995年,国有重点露天煤矿产量达36.65 Mt,占全国有重点煤矿总产量的7.5%。露天开采工艺也开始多样化,1980年以前,电铲铁道工艺占91%,电铲卡车工艺占9%。20世纪末,国有重点露天煤矿16处,生产能力46.45 Mt/a,其中电铲铁道工艺8处,生产能力11.6 Mt/a,占25%;电铲卡车工艺4处,生产能力17.35 Mt/a,占37.4%;综合开采工艺3处,生产能力17.5 Mt/a,占37.6%。这一时期,露天开采的技术装备水平也大幅度提高。电铲斗容已达32 m³,卡车载重已达172 t,轮斗铲、带式输送机和排土机均投入使用,许多设备国内已能制造,如23 m³电铲和154 t卡车等。目前,千万吨级的露天矿的主要设备我国已能自行装备,两千万吨级的露天矿设备也在合作制造之中。经过改革开放后的大发展,我国已经能够设计、建设和管理现代化的特大型露天煤矿了。

露天煤矿迅猛发展的一段时间内,露天矿的设计理论研究明显滞后。在改革开放前,露天工作者对比较单一的电铲铁道工艺和引进的剥采比均衡法十分熟悉,沿用了40多个春秋。改革开放后,国门打开了,电铲卡车工艺和连续工艺引进来了,西方的模拟设计也引进来了,这些技术工艺使大家普遍感到新鲜,它的先进、高效也的确展现出了良好的经济效益。

但是,完全照搬国外技术是不够的!为了更好地开发露天矿,更好地吸收国外一切先进的科学技术,也为了更好地发展符合中国特色的露天矿设计理论,我国应该在近半个世

纪实践的基础上,努力探索并创造出自己的东西,为我们祖国的现代化服务,这就是作者编写本书的出发点和归宿。反映在本书中的新理论和新观点主要有以下几个方面。

(1) 露天矿区择优开发评价体系。露天煤矿的开发落后于矿井,除了露天开采要求的条件受到限制外,地质勘探工作滞后也是重要原因之一。在已查明的露天矿区,往往又由于缺乏科学的评价,导致“择优开发”原则落空,造成巨大的损失。在择优开发方面比较成功的是平朔露天矿区。开发平朔露天矿区优先开发安太堡露天矿,无疑是正确的,以后依次开发安家岭露天矿和东露天矿,也符合择优开发的原则,并已收到良好的经济效益。准格尔露天矿区的开发就不够合理。该区自北向南有窑沟、黑岱沟、哈尔乌素3个大型露天矿田,勘探初期曾把窑沟作为重点,做了一段工作后才发现黑岱沟条件更为优越,于是把重点转向黑岱沟(现已建成并生产);然而,从开发条件来看,哈尔乌素是3个露天矿中最好的一个,如果当初认真择优,先开哈尔乌素,可能比先开发黑岱沟效果更好。可见,建立露天矿区择优开发的评价体系是一项很重要的工作。本书就该评价体系的指标功能、基本原理、模型系统、权重生成等提出了新的见解,并介绍了几个大型露天矿区的决策实例,对今后露天矿区的择优开发将具有重要的参考价值。

(2) 计算机技术在露天采矿中的应用。计算机在矿业中的应用日趋广泛,发展也是日新月异。本书除了介绍有代表性的、实用价值较高的矿床地质模型和地质资源评价外,详细介绍了开采程序模拟技术和通用软件包,从而使矿山开采的多方案动态综合优化成为实用技术。

(3) 当量剥采比新概念。它包括当量经济剥采比和当量生产剥采比。长期以来,经济合理剥采比始终是圈定露天矿境界的重要基础。这里所谓“经济合理”是指露天矿边界部分的开采成本与矿井相等,换言之,边界以下的部分如用露天开采,其成本将超过矿井开采成本。这项原则应用了半个世纪,似乎是天经地义,无可厚非。然而,仔细推敲起来,就会发现这项原则的悖谬。按照这种露天和矿井的开采成本相等来确定的露天开采边界,完全忽视了露天开采在以下各方面的优越性,资源采出率高达95%以上,而矿井采出率平均仅32%;安全条件好,百万吨死亡率仅为国有矿井的1/30。我们提出在经济合理剥采比的计算中,应该引入一个大于1的“超采率系数”和一个大于1的“安全优越系数”,才能全面反映露天开采的优越性。综合考虑露天开采在采出率和安全性方面的优势,在原来经济合理剥采比基础上引入一个大于1的“当量系数”,从而形成“当量经济剥采比”,并用于圈定露天开采的境界,显然是必要的。

(4) 合理确定矿山开采规模。以往露天矿设计规模的确定,一方面存在着严重的主观随意性,一座露天矿往往要经过多次设计与审查,而历次设计规模均不相同,例如某矿做过10部设计,规模从3 Mt/a到26 Mt/a,相差8~9倍;另一方面,缺乏市场经济观念,既没有考虑经济地理因素与市场竞争态势,又没有采取措施强化矿山自身的适应市场能力,造成只投产不达产,给矿山企业带来巨大经济损失。作者提出确定合理矿山规模的科学程序,同时依托露天矿增产潜力大的优势建议采用“不饱和规模”,作为设计规模,以提高露天矿适应市场变化的能力。

(5) 优化露天矿开采参数。露天矿田普遍较大,开发时必须划分为条区依次开采,条区宽度合理与否对矿山的生产成本影响极大。作者归纳了国内外几种主要生产工艺的开采参数和相应的优化方法,而且针对应用最广的单斗铲卡车工艺提出了确定经济工作线长度

的理论，为露天矿划分条区时确定条区宽度提供了理论依据，改变以往凭借主观经验确定条区宽度的盲目性。

(6) 优化露天矿剥采计划。露天矿剥采计划的优化是矿山设计优化理论的核心。迄今为止，露天矿剥采计划的优化可以分为两类，一类是均衡类，以我国引进的“剥采比均衡法”为代表，即对自然生产剥采比进行人为的分期均衡，以求得矿山生产的均衡；另一类是模拟法，以西方国家的“利润最大化模拟”为代表，要求矿山按自然剥采比安排生产，排斥人为均衡和做任何超前剥离。两者各有利弊，均衡法对组织生产有利但要为超前剥离付出代价；模拟法生产成本可能较低，但生产波动较大，对发挥大型设备的效率不利。作者提出“剥离运输功均衡法”，即运用对于生产成本影响最大的两项要素生产剥采比和剥离运输距离的乘积，人为分期均衡，要求矿山按均衡的剥离运输功安排生产。这不仅拓宽了均衡途径，也便于更有效地削减剥离洪峰和调节生产成本的高低，这一点对于矿山经营者显然是十分有用的。

此外，作者对露天矿主要设备选型与配套以及设计优化的评价，也提出一些比较适应市场经济的观点和方法。

本书第一、二、六、八章由张瑞新执笔，第三、四、五、六、七章由于汝绶、王宝庭执笔，第九、十章由于汝绶、刘光执笔。全书经我国著名的采矿专家张先尘教授审阅。

由于作者的水平所限，有些方面显得粗糙和不足，比如对综合开采工艺，就未能展开讨论；对露天矿的开拓问题，尤其是井巷开拓方式，基本上没有涉及。作者恳切希望得到读者的批评和指正，更盼望露天采矿工作者能更上一层楼，把我国露天矿开发得更好。

著 者

2004 年 12 月



1

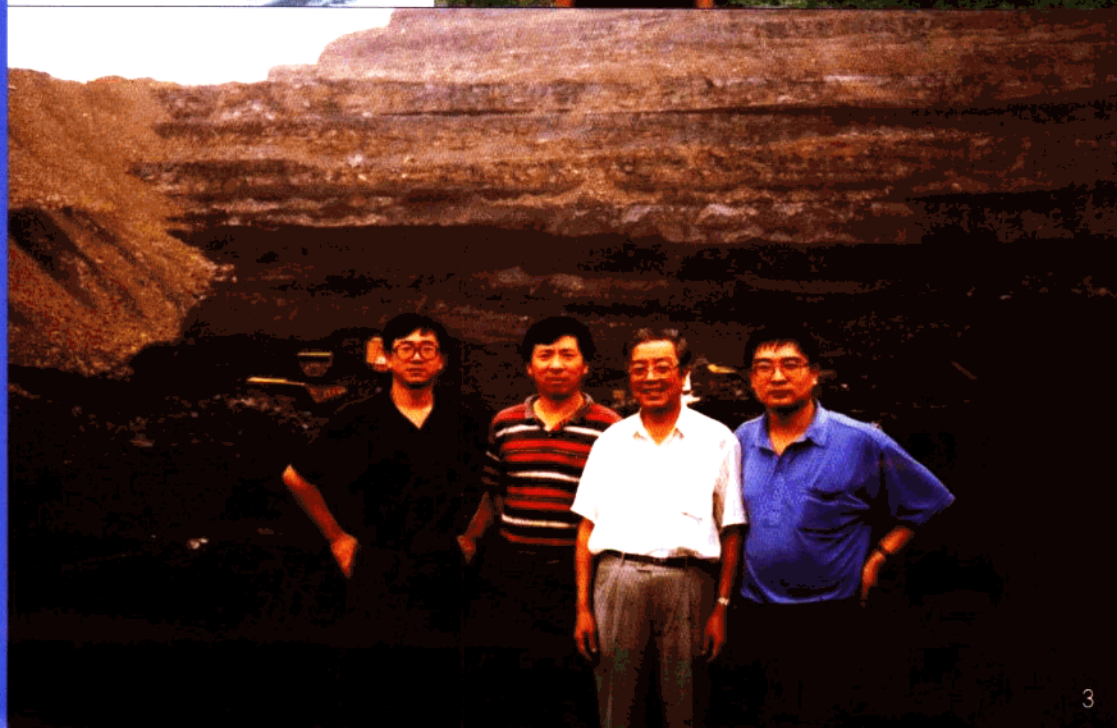
1 于汝绶教授在鹤岗岭北露天煤矿 (1987 年)。

2 于汝绶教授在美国得州圣米盖尔露天矿 (1987 年)。

3 于汝绶教授在平朔安太堡露天煤矿 (1990 年)。



2



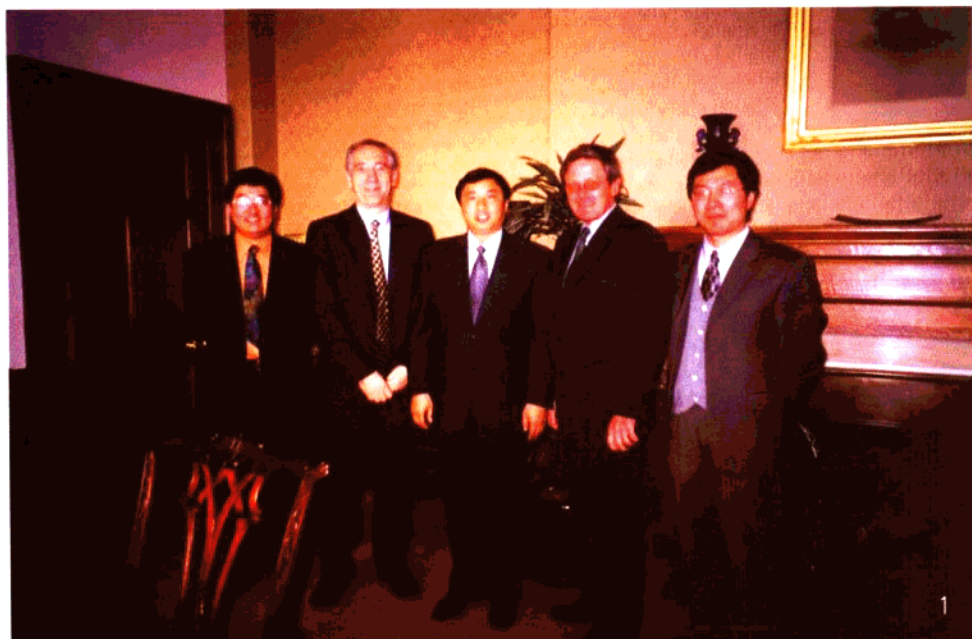
3

- 1 中国露天开采专业的开创者（左起）：于汝绶、彭世济、骆中洲（1986 年）。
2 于汝绶、张瑞新、刘光休憩途中（1991 年）。





- 1 张瑞新教授与研究生们在一起 (2004 年)。
- 2 张瑞新在印尼 PT BUKIT SUNUR 煤炭公司担任采矿专家 (1995.5 ~ 1996.4)。
- 3 张瑞新教授在准格尔黑岱沟露天煤矿 (2000 年)。



- 1 张瑞新访问英国诺丁汉大学（2002年）（左3为中国矿业大学校长谢和平教授，左4为英国诺丁汉大学校长 Colin Campbell 教授）。
- 2 张瑞新出席国际 APCOM 会议（2001年）。
- 3 张瑞新在英国诺丁汉大学作高级访问学者（1997.9 ~ 1999.3）。

目 录

序 前言

第一章 矿床地质模型及地质资源评价	1
第一节 概述	1
第二节 地质信息处理与数据库	7
第三节 地质估值方法的优化与应用	13
第四节 矿床地质模型	21
第五节 地质资源评价	29
第二章 露天煤田开发的优序决策	40
第一节 概述	40
第二节 露天煤田开发条件综合评价指标体系的确定	41
第三节 评价指标权重的确定及分析	45
第四节 专家评价准则	49
第五节 七大露天煤田开发顺序的优序决策	61
第三章 露天矿开采境界与设计规模	69
第一节 剥采比	69
第二节 开采境界	73
第三节 圈定境界的基本方法及述评	75
第四节 影响境界圈定的因素分析	77
第五节 当量经济剥采比	80
第六节 露天矿设计规模的合理确定	84
第七节 规模的分期与衔接	89
第四章 露天矿生产工艺系统的优化	93
第一节 露天矿生产工艺系统类型	93
第二节 工艺优化原则	97
第三节 剥离工艺的优化	100
第四节 采煤工艺的优化	107
第五章 露天矿主要设备的选型与配套	110
第一节 露采设备评价	110

第二节	轮斗铲的选型与配套	112
第三节	拉铲的选型与配套	123
第四节	单斗铲的选型与配套	129
第五节	露天采矿机的选型与配套	139
第六章	采运设备及系统的能力评价	149
第一节	评价指标及统计方法	149
第二节	设备运行状况与生产能力分析	154
第三节	采运系统能力评价	160
第七章	露天矿开采程序的优化	163
第一节	开采参数的优化	163
第二节	条区划分与沟位选择	190
第三节	开采程序的优化	198
第四节	实例研究	208
第八章	排土场及排弃物料流向流量的优化	224
第一节	排土场的建立与发展	224
第二节	排土场段高的优化	226
第三节	排土场境界优化	230
第四节	矿岩运距计算	232
第五节	土岩流向流量的优化	233
第六节	实例研究	235
第九章	露天矿剥采计划的优化	239
第一节	剥采比均衡法	239
第二节	剥采计划模拟法	245
第三节	剥离运输功均衡法	246
第四节	实例	248
第十章	露天矿优化设计评价	260
第一节	露天矿优化设计的技术评价	260
第二节	露天矿优化设计的经济评价	262
第三节	重复建设与市场预测	267
	参考文献	272

第一章 矿床地质模型及地质资源评价

第一节 概 述

矿床地质模型是地质资源评价与采矿工程决策优化的基础，是应用计算机技术进行矿山优化设计及矿山现代化管理的桥梁和纽带。用计算机分析和解决采矿工程问题，首先要建立矿床的计算机表示，即将开采区域内的矿床地质信息（位置、结构、分布特征等）转换成可为计算机识别及运算的数字化模型，也就是矿床地质模型。矿床地质模型一般包括地形模型（原始地形、开采中的动态地形）、矿床结构模型（矿床位置、厚度、结构等）和矿床质量模型等。

地质资源评价是一项包括资源自然条件和可采性及勘探控制程度的综合评价，它贯穿于矿区开发的全过程。不同阶段评价目的和内容不尽相同。矿区地质条件评价广义上包括资源条件评价、开采技术条件评价以及开发效益评价。其中资源条件评价是矿床开发评价的核心问题，包括煤层厚度、煤层空间分布稳定性、煤炭储量及质量，以及剥采条件的综合评价。

一、矿床地质模型构造方法简述

矿床构模技术随着采矿计算机软件的发展而发展。目前，矿床地质模型构模技术可以概括为块段构模法、线框构模法、实体构模法、断面构模法和表面构模法^[1,2,3]。

为方便矿床模型的研究与应用，一般将矿床划分为三大类：侵染状矿床、层状矿床和脉状矿床；矿床的开采方法分为两大类：露天开采和地下开采。在选择矿床构模方法时，既要考虑到矿床的类型，又要考虑到矿床的开采方法，使所选择构模方法能较好地模拟矿床和开采境界，同时也要考虑要达到的目标。因为，不同的构模技术适用的矿床和开采环境是不同的，所能达到的目标也不同。一般认为，块段构模技术适用于侵染状矿床或规模足够大且形状比较规则的矿床和简单开采环境；实体构模技术适用于各种矿床和各种开采环境以及对模型精度要求较高的场合；断面构模技术也是一种实用性强的构模技术，适用于对模型要求不太高的场合；表面构模技术一般只适用于层状矿床和露天开采环境。

1. 块段构模法

块段构模法的研究和应用始于 20 世纪 60 年代初，是一种传统的矿床构模方法。这类构模技术是把要建立模型的整个立方块空间分割成规则的三维立方网格，称为块段，每个块段在计算机中存储地址与其在自然矿床中的位置相对应，在每个块段中，由克里格法、距离加权平均法或其他方法确定的状态指标（如品位或质量）被视为常数，且近似由一种物料组成，这样所构造的模型称为块段模型。这种技术有一个明显的优点，在编制程序时可以采用隐含的定位技术，以节省存储空间和运算时间。

块段构模法主要用于描述侵染状金属矿床品位的空间分布，特别是向煤层这样的层状矿床，更是易于以二维数组表征其状态变量。因此层状矿床多使用二维块段构模法建模。随着对该技术的逐步改进，特别是为满足矿体边界或开采边界的描述，采用可变尺寸块段构模技术，在接近边界处设置较小的子块段，用来更加详尽地逼近边界，从而较精确的模拟矿体边界，因此，改进后的块段构模技术可应用于更复杂的不连续矿床或复杂的三维开采环境。

2. 线框构模法

线框构模法是块段构模技术中用于分割块段的一种建模工具，它提供一个模板，用于确定块段是在所描述的地质边界或开采边界的内侧还是外侧。线框构模技术是一种表面构模技术，就是把面上的点用直线连接起来，形成一系列多边形（在有些采矿软件中，如Datamine，被限制为三角形，以避免面定义的模糊性并简化模型的管理程序），然后把这些多边形面拼接起来形成一个多边形网格来模拟地质边界或开采边界。

3. 实体构模法

虽然借助于线框构模技术和块段分割技术构造满足任意精度要求的任意类型矿床的块段模型是可能的，但这样做可能效率不高，因为每一次开采或地质边界的变化都要进一步分割块段，即修改一次模型。传统的块段构模方法所存在的问题出自于用一个简单的模型和构造过程同时表达边界和品位或质量的分布，块段模型是表达品位或质量三维空间分布的最佳技术，但不是表达边界的最佳技术，原因在于描述地质或开采边界的自然途径不是一组离散化块段，而应该是由若干个平面或断面上的一系列线段所构成的多边形网格，而且所需的存储空间也要少得多。因此，近10年来，采用多边形网格描述地质和开采过程形成的形体边界，而用传统的块段模型描述形体内部的品位或质量的分布的所谓实体构模技术获得了广泛重视。以加拿大Lynx系统中三维元件构模（3D Component Model）技术最具有代表性，它具有完善的几何皂型方法和精确的三维体积计算功能。实体构模技术是一种先进的构模技术，适用于各种矿床类型和开采环境，是矿床构模技术的发展方向^[4,5,6]。

4. 断面构模法

传统的手工方法是用一系列平面或剖面图模拟矿床的，断面构模技术正是再现标准的手工方法的计算机矿床构模技术，即通过平面图或剖面图来描述矿床，记录地质信息，其特点是将三维问题二维化，大大简化了模型的设计和程序的编制，同时在地质描述上它也是最方便、适用性最强的一种构模技术，但它在矿床的表达上是不完整的，往往需要同其他构模方法配合使用。

5. 表面构模法

表面构模可以设想成在一系列数据点上铺设一个“覆盖面”的过程，表面模型有时也称为数字地面模型（Digital Terrain Models, DTM），有很多方法可以用来表达表面，如基于点的建模方法、基于格网的建模方法、基于三角网的建模方法和将其中任意两种结合起来的混合建模方法。在实际应用中，基于点的建模不实用，而混合建模往往也转换成三角形网格，因此，基于三角形和格网的建模方法使用较多，被认为是两种基本的建模方法。就表达地形信息的角度而言，不规则三角网（Triangulated Irregular Network, TIN）模型的优点是它能以不同层次的分辨率来描述地形表面。与格网数据模型相比，TIN模型在