

分类号.....

密级.....

UDC

编号.....

中南大學

CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

硕士学位论文

论文题目： 栾川三道庄矿三维模型的建立

与地下空区可视化研究

学科、专业： 工程力学

研究生姓名： 曾 凌 方

导师姓名及
专业技术职务： 李夕兵 教授

分类号_____

密级_____

UDC _____

编号_____

硕士学位论文

栾川三道庄矿三维模型的建立与地下
空区可视化研究

**Three-Dimensional Model Establishment and
Underground Goafs Visualization Research in
Luanchuan Sandaozuang Mine**

作者姓名： 曾 凌 方
学 科 专 业： 工程力学
学院(系、所)： 资源与安全工程学院
指 导 教 师： 李夕兵 教授

论文答辩日期_____

答辩委员会主席_____

中 南 大 学
年 月

摘要

矿床三维模型是“数字矿山”的基础，是矿床的数字表征。随着“数字矿山”的提出，三维模型越来越被从事矿山管理和研究的人员所重视。

金属矿床地下开采形成的大量采空区不仅危及矿山的安全，而且对资源的充分回收造成严重的困难。因此，以先进的空区探测系统为手段，开展以空区精密探测为基础的相关技术的研究与应用，已经成为我国金属矿山安全生产所面临的重大前沿研究课题。

河南三道庄钼矿是大型矿床，不仅有可观的钼储量，而且在矿区范围内还有一定量的金、银等伴生金属。由于矿山原先采用的空场法采矿所留下的采场、硐室以及巷道成为露天开采时的地下空区，地下空区对矿山的生产带来严重的威胁。因此，地下空区的可视化对露天台阶的稳定性分析是至关重要的。

本文通过对不同类型的三维建模软件的对比，选择澳大利亚 Surpac Minxe Group 开发的 Surpac Vision 5.1-F 版软件作为三道庄矿三维建模平台。利用矿山提供的钻孔资料，选择 Microsoft Access 2000 数据库类型，运用 Surpac 软件系统，建立了矿体模型、露天坑模型、地表模型等。

准确建立力学计算模型是岩土工程稳定性数值模拟研究的基础。采空区的实际三维形态和准确的空间位置是影响采空区稳定性数值模拟可靠性的重要因素。然而，在传统的采空区稳定性数值模拟中，往往将采空区的形态视为空区开挖设计时确定的规则形态，或者是利用人工的简化模型进行模拟，严重影响了数值模拟结果的可靠性。本文应用空区全自动激光探测系统(Cavity Auto scanning Laser System, 简称 C-ALS)，精确地获取了空区的三维形态和准确的空间位置，借助于 Surpac 建立起的地质模型，使空区模型和矿山整体模型耦合起来，并提出了一种空区稳定性数值模拟建模的 Surpac 和 Flac^{3D} 耦合方法，形成了基于实测的采空区稳定性数值模拟耦合新技术，有效地提高了采空区稳定性数值模拟结果的准确性和可靠性。

关键词： 三维地质模型，Surpac 软件，空区探测，C-ALS，数值计算

ABSTRACT

Three-dimension models of deposit are the foundation of “digital mine” and the digital characterization of deposit. With the development of “digital mine”, the researchers pay more and more attention to the three dimensional model.

A large amount of cavities, formed by underground mining in the metal mineral resources, are not only endangering mine’s safety but also doing harm to reclaim the resource sufficiently. Therefore, the research and application, based on the Cavity Monitoring System, have become significant issues in the metal mines of our country.

The Sandaozhuang mine in Henan province is a large deposit, in which there is a great deal of molybdenum, and there are some associated metals such as Au and Ag. The stopes, chambers and roadways, left behind by the original mines, have become underground goafs when the mines are open pit mining. And the underground goafs hazard the producing process badly. So it is very important for the open-air stage stability analysis to establish visualization of the underground goafs.

The paper compares with the different types of three-dimensional modeling software. At last, I have selection Surpac Vision 5.1 F developed by Surpac Minex Group as the platform for the modeling of the Sandaozhuang mine. Based on the borehole data offered by the mine, the orebody model, Open pit model and surface model are established by the Microsoft Access 2000 and the Surpac software.

An accurate model of the mechanics calculation is established is the foundation of numerical simulation study on rock and soil engineering stability. The actual 3D Shape and accurate spatial position of underground goafs are the important factors which affect the reliability of the numerical simulation of underground goafs stability. However, in the past, the shape of the cavity was usually taken as to be a regular one which is confirmed by the stope mining design, or even used a simple manual model in the process of the numerical simulation, which depressed the reliability of the numerical simulation results seriously. In this paper, The three-dimensional shape and the spatial location are

obtained accurately by using Cavity Auto scanning Laser System, and the three-dimensional shape model of the cavity is established precisely by using the surpac software. Coupled cavity model and the all model of the mine build by surpac software, a kind of modeling method for numerical simulation on underground goafs stability by coupling Surpac and FLAC^{3D} is put forward. So, a new coupling technique of numerical simulation on underground goafs e stability based on cavity monitoring is formed, which improve the availability and reliability of the numerical simulation results effectively.

Keywords: Three-dimensional geological, Surpac software, Cavity monitor, C-ALS, numerical simulation.

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
目 录.....	IV
第一章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 三维地质建模研究现状.....	2
1.2.2 采空区探测研究现状.....	3
1.2.3 采空区数值模拟现状.....	5
1.3 课题研究的目的和意义.....	6
1.4 主要研究内容和技术路线.....	7
1.4.1 研究内容.....	7
1.4.2 主要研究技术路线.....	8
第二章 矿山地质.....	9
2.1 概况.....	9
2.1.1 地理交通位置.....	10
2.1.2 地质资源.....	10
2.1.3 水、电供应状况.....	10
2.1.4 气象条件及地震烈度.....	10
2.2 矿区及矿床地质特征.....	10
2.3 矿床水文地质及开采技术条件简述.....	11
2.4 采场构成要素与采矿方法.....	12
第三章 矿山三维建模的建立与矿量计算.....	14
3.1 三维模型可视化的优势.....	14
3.2 矿山地表模型的研究与建立.....	15
3.2.1 地形建模研究与栾川三道庄矿地形模型的建立.....	15
3.3 露天坑模型的研究与建立.....	18
3.3.1 露天坑三维模型的转换.....	18
3.3.2 露天坑三维数据的检查.....	18
3.3.3 露天坑三维模型的建立.....	18
3.4 矿体模型的研究与建立.....	19
3.4.1 钻孔数据库的建立及可视化.....	20
3.4.2 原始钻孔数据表.....	20

3.4.3 钻孔数据库的创建.....	23
3.4.4 钻孔的三维可视化.....	23
3.4.5 三维矿体模型的建立.....	24
3.5 整个矿山模型的研究与建立.....	25
3.6 矿体估值和品位的分布.....	26
3.7 矿体矿量计算.....	29
3.8 本章小结.....	34
第四章 采空区探测与三维模型的建立.....	36
4.1 采空区的形成.....	36
4.2 采空区的探测与可视化.....	37
4.2.1 C-ALS 探测系统的介绍.....	37
4.3 C-ALS 探测系统在栾川三道庄矿的应用.....	39
4.3.1 1438-2 空区水平实测情况.....	39
4.3.2 1330 水平空区的实测情况.....	40
4.3.3 1414 水平空区实测情况.....	41
4.3.4 1438-1 水平大型空区实测情况.....	42
4.4 采空区在整个矿山模型中的耦合.....	44
4.5 本章小结.....	45
第五章 采空区的数值模拟与力学分析.....	47
5.1 计算模型的选择.....	47
5.2 计算模型力学参数的确定.....	49
5.3 露天台阶开挖前后围岩应力场分析.....	52
5.3.1 开挖前初始的应力场分析.....	52
5.3.2 露天台阶开挖后围岩应力场分布.....	53
5.4 露天台阶开挖后围岩位移场分析.....	55
5.5 本章小结.....	58
第六章 结论和展望.....	59
6.1 本文的主要研究成果和结论.....	59
6.2 对进一步工作的展望.....	60
参考文献.....	61
致 谢.....	67
攻读硕士学位期间主要研究成果.....	68

第一章 绪论

1.1 引言

金属矿床地下开采形成的大量采空区是危及矿山安全的主要灾源之一。在我国许多大型地下开采金属矿山，如广西大厂矿区、甘肃厂坝铅锌矿、铜陵狮子山铜矿、云南兰坪铅锌矿、广东大宝山矿、郴州柿竹园多金属矿等都存在着大量采空区^[1]。大量采空区的存在使矿山开采条件恶化，造成矿柱变形破坏，相邻作业区采场和巷道维护困难；更严重的是因空区引发的井下大面积冒落、岩移、地表塌陷和突水等，将造成严重的人员伤亡和设备破坏。大量灾害空区的存在已经对我国矿山安全生产构成了严重威胁。

针对矿山采空区隐患，我国采矿工作者做了大量的工作，如采用探地雷达及高密度电法、地震映像法等地球物理方法开展空区探测工作^[2~5]。但这些方法对地下矿山、尤其是地下金属矿山的空区信息的获取能力不足，尤其是对获取到的探测信号的处理和解释都存在明显的弱点，严重影响对后续空区安全性评价的可靠性。由于过去国内对于空区缺乏有效的精确探测手段，对地下空区形态及相关信息掌握的准确程度明显不足，建立的空区模型往往因缺乏必要和精确的基础性数据而致使其应用效果不佳等各种因素的影响，所以对空区安全性评价和灾害预警，以及空区治理方案的科学制订也就缺乏必要的基础性依据。因此，以先进的空区探测系统为手段，开展以空区精密探测为基础及其衍生技术的研究与应用，已经成为我国矿山安全生产所面临的重大前沿研究课题。

在对采空区稳定性进行科学评价的基础上，采取合理的工程措施对其进行有效处理，是采矿工程实践中常需要解决的问题。由于矿山地质及采矿条件的复杂性，致使采空区的危害性定量评价较为困难。目前，关于采空区的危害性研究最主要的是预测采空区在一定年限内的剩余位移变形量或发生突然塌陷的可能性。评价方法虽然很多，但尚需解决一些关键问题，主要包括地质力学模型的合理建立，工程动态施工过程的模拟，采空区空间相对位置的影响、时间效应的考虑，采空区稳定性和容许变形界限值的确定即处治与否的界限，采空区治理的原则和需达到的标准，施工后可能变形值的预测等。因此、深入研究空区的位置、大小和体积，并且对空区所在的实际位置进行数值模拟，得出采空区所在位置的围岩应力应变以及位移情况是现在人们治理采空区的主要手段，也是当今社会研究采空区的趋势。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 三维地质建模研究现状

所谓三维地质模型,是指运用计算机技术,在三维环境下,将空间信息管理、地质解析、空间分析和预测、地学统计、实体内容分析以及图形可视化等工具结合起来,并用于地质分析的技术^[6]。它是由地质勘探、数学地质、地球物理、矿山测量、矿山地质、GIS、图形图像和科学计算可视化等学科交叉而形成的一门新兴学科。三维地质建模问题必须解决以下问题:一是开采环境(如地形、岩层、岩体、矿体、工程)的空间位置与几何形态,二是反映开采环境特征的相关参数(如矿石的品位、岩体强度、岩体质量指标等)的推估问题。

CaslsonE • 在 1987 年从地质学的角度提出了地下空间结构的三维概念模型,开辟了地下三维数据模型的先河^[6]。随后,国外的 Carl Youngmann、MolenaarMarien、AaperJ • F、TurnerA • k、Thomas R • Fihsher、RongxingLi 对三维地质模型的表面模型结构、空间数据结构、三维矢量地图的数据结构、GIS 系统的三维地质模型等方面进行了研究,提出了三维地质模型的数据结构和建模方法^[7~9]。国内对三维地质建模的研究较晚,进入 90 年代以后才开始对三维地质模型的实现进行研究,李清泉提出了基于混合结构的三维 GIS 数据模型^[10],牛雪峰提出了面向对象的数据结构模式,龚健雅提出了矢量与栅格继承的三维数据模型,白世伟提出了基于三棱柱体体元的三维地层建模方法及应用^[11],张菊明对三维地质模型的设计和显示进行了研究,采用空间平面、单值曲面和多值曲面建立三维数学模型,对各种地质信息的空间分布进行描述^[12]。

随着对三维地质模型理论研究的深入,三维地学模拟被广泛应用于虚拟矿山系统、石油、GIS、地质、岩体边坡地质信息系统等领域^[13~15],出现了一批在石油、矿山和工程地质得到广泛应用的商业软件。由美国 XOX 公司开发的 SHAPES,采用格状模型(Cellular)的集合形体表示模型,成功解决了多维曲面交叉计算及与此相关的问题,由加拿大 Kirkam Gcosystems 公司开发的 MicriLynx,采用一种棱柱的体元表示法建模,可以对钻孔、测井记录、TIN 模型等进行综合管理;法国研制的 Gocad 软件,基于表面内插技术 DSI,可以考虑不确定数据;由美国 Dynamic Graphic 公司研制的 IVM,在模型上使用规则三维栅格空间模型,在每个栅格接点都有可计算的特性信息,其主要优点是具有对连续空间中的各种现象进行建模、实现、分析的能力,但该系统对属性不连续变化的对象,如矿石类型的表示和处理有一定的困难;DGI 公司的地球可视模拟系统软件包所生成的三维空间立体图形较为清楚地反映了地层与地质结构的分布及其相互关系。

在矿业领域,西方矿业界在 20 世纪 70 年代初就将 CAD 技术应用于地质、矿业领域;20 世纪 80 年代末三维地质建模和可视化理论及技术的发展,推动了矿山计算机辅助地质建模技术。一大批具有三维地质建模功能的地质采矿软件被

开发应用。90 年代中后期, 三维地质采矿软件逐渐成为矿山专业软件的主流。国际著名的地质采矿软件公司相继开发了专业三维软件, 主要有 Micromine、Surpac、Datamine、Lynx、Vulean、Minescape、Geocom、Minesoft、Mine-sight、Gocad、Whittle 等, 近年来, 国内矿山企业从国外引进了 Micromine、Surpac, Datamine 等软件, 推动了矿山企业的信息化和数字化建设^[16-21]。

经过近四十年的发展, 今天的采矿软件已经形成了相当的规模。从历届 APCOM 会议资料来看, 以矿床模型为代表的矿业软件发展迅速, 西方采矿大国相继推出用于地质资料处理、矿床建模、采矿设计、计划编制、测绘图形处理等方面的矿用商品化软件, 如: Datamine、Surpac、Micromine、Mintec、Lynx、Mincom、Vulean、Minemap 等, 应用于许多矿山, 特别是澳大利亚、北美和南非的一些矿山, 取得了很好的经济效益。今天采矿工业可以购买的软硬件系统的数量和品种很多。这些软件主要功能类似, 但由于大多数软件是在矿山公司专用软件基础上发展起来的, 其侧重点有所不同, 有些侧重于地质建模, 有些侧重于露天开采或地下采矿等。

澳大利亚 Surpac 国际软件公司(Surpac Software international, 简称 SSI)开发的 Surpac 软件是一套三维交互式图形软件系统, 具有地表测量数据处理、地质勘探数据分析和采矿设计等功能。其应用领域主要包括勘探和地质模型、资源评估、露天和地下采矿设计、生产计划和开采进度计划编制以及尾矿和复垦设计等。经过二十多年的发展, 该公司已成为全球最大的矿业软件公司之一。目前, 在全球 90 多个国家和地区拥有 4000 多个用户, 在我国亦有包括金川集团有限公司、首钢矿业公司在内的 30 多个授权用户^[22]。

英国的矿山计算有限公司(Mineral Industries Computing Ltd, 简称 MICL)开发的 Datamine 采矿软件系统, 包括地质信息处理、矿床模型构造、采矿设计、矿山调度与计划等模块。它最大的特点是屏幕上的作图功能, 可以将露天或地下矿山设计所需要的各种图形, 包括钻孔及岩芯分布、矿体及主要开拓巷道位置或露天矿坑等, 以三维和彩色的形式在计算机屏幕上显示出来。该软件的核心是一个包含许多 CAD 特点的交互式作图平台, 能够方便地显示并调整钻孔、矿床模型、地表模型等。其应用主要在地质勘探数据处理、露天或地下矿设计、矿山调度以及生产计划编排等四个方面^[23-27]。

此外, 还有澳大利亚 Micromine、Gemcom、Mincom、Minemap 等公司开发的矿业软件系统, 具有地质统计、矿体造型和采矿设计等功能, 在很多国家的矿山中得到广泛的推广和应用^[28-47]。

经过对上述软件的功能和操作的方便性对比, 发现 Surpac 具有强大的建模功能, 该软件在国内矿山应用比较广泛, 得到了矿山管理者的一致好评。

1.2.2 采空区探测研究现状

由于地下采空区形状复杂, 目前在地下采空区精细探测方面, 国内外均处于

起步和探索阶段，常规的采空区探测方法有：地震法、电阻率法、电磁法、常规电法等，近年来又相继出现了精度更高的三维地震探测技术、地震 CT 探测技术、瑞雷波探测技术、探地雷达(GPR)探测法和激光 3D 探测技术。随着计算机技术的不断进步，计算机层析成像技术(CT)得到了飞跃发展，把 CT 技术应用到地球物理学，使得采空区的精细探测尽可能准确。从探测原理上，可把空区探测技术分为：电法、电磁法、地震法、微重力法和射气法，其中电磁法、地震波法和电法空区探测技术情况^[48~52]见表 1-1 至表 1-3。

表 1-1 电磁法空区探测技术对比表			
种类	瞬变电磁法	探地雷达法	井间电磁波透视法
物理前提	电磁性差异		
成果解释	纵线	剖面	剖面
应用条件	适用于较复杂地形，测试容易，数据采集处理自动化，解释难度大	适用于高阻地质体，不受地形影响,图像直观解释容易	前期工作难度大，后期测试容易，数据资料整理容易
有效深度	500m	30m	等效钻孔深度
精度范围	10%-15%	5%	5%
干扰因素	电线、地下水管、电磁干扰等		
解决问题及效果	适用于各种形状空区、冒落带、低阻效果好	适用于高阻空区，低阻效果差	各种形状空区、冒落带
分辨率	较高	高	高

表 1-2 地震波法探测空区技术对比表			
种类	反射波法	CT 法	瑞雷波法
物理前提	波阻抗差异		
成果解释	纵线	剖面	剖面
有效深度	≤500m	等效钻孔深度	有效深度
精度范围	10%	±7%	H/D>10，±5%
干扰因素	各种噪声干扰		
解决问题及效果	适用于各种形状空区	适用于各种形状空区	适用于各种形状空区
分辨率	较高	高	低

表 1-3 电法空区探测技术对比表

种类	高密度法	电磁探法	电剖面法
物理前提		电性差异	
成果解释	剖面	纵线	横线
应用条件	适用于任何地层产状，良好的接地条件	岩层倾角小于 200 地形坡度小于 300，表层电性均匀	接地条件好、受干扰低、沿测线地形起伏不大
有效深度	≤100m	1000m	200 m
精度范围	10%-20%	10%-30%	10%-30%
干扰因素	电线、地下水管、电磁干扰、电流等		
解决问题及效果	适用于各种形状空区、冒落带、低阻效果好	适用于高阻空区，低阻效果差	各种形状空区、冒落带
分辨率	较高	低	低

除上述方法外，目前最新的空区探测方法 3D 激光探测法，是利用激光的高度精确性对地下采空区的形态大小和位置进行三维探测的新型方法。激光 3D 扫描仪能迅速记录与所观测对象有关的大量三维数据信息，其探头具有较好的伸展柔韧性，它的装置采用不锈钢制作，可以在水平和竖直方向进行 360⁰ 旋转测量。数据遥感勘测系统可以将所有的测量数据送回外部的主控装置，同时利用计算机获取并管理数据，通过软件处理、观察和编辑数据，可以建立采空区的空间立体形态模型，并进行数据分析^[53~56]。

上述所有探测方法中，除 3D 激光探测法外，其余方法均不同程度地存在着抗干扰能力较弱，勘探深度有限，探测结果不够精确，完成探测后需要对探测结果(图形)解释，过程繁琐，可视化程度低，且测量精度低等缺点。3D 激光探测法是目前国际上一种新型空区探测方法，该方法能快速而准确的探测出空区的三维形态及空区空间位置，探测结果可视化程度高，后处理系统功能强大，具有很好地应用效果，具有探测方便、操作简单、后处理强、探测精度高等特点。该技术在国内外还刚刚处于起步阶段，具有很好的发展和应用前景。

1.2.3 采空区数值模拟现状

数值模拟以地表移动为研究对象，计算中的参数物理意义不明确，所以不能很好的解释岩层地表移动的内在力学本质^[57]。而且当上覆岩层地质条件比较复杂时（如存在岩石节理、裂隙、断层等），这种岩层移动预测理论和技术一般并不适用；另一方面力学研究方法虽然可以从力学本质上对岩层与地表的移动作出解释。但是，由于实际的开采过程中地质条件复杂性以及其它众多工程因素的影响，目前还没有一种计算岩层移动性态的完善的力学模型。在这样一种情况下，研究人员想到了用数值模拟的办法来解决这一问题^[58,59]。随着大容量、高速度计算机的出现，尤其是功能强、速度快的工程数值分析软件的开发，数值分析方法

已经用于地下岩层移动的数值模拟和地表变形的预测^[60]，使得数值分析已经成为研究复杂地质条件下，岩层移动机理模拟与移动参数预测的一种重要手段。在开采塌陷研究领域，常用的数值分析方法有：有限单元法、边界单元法、离散单元法以及有限差分法等^[61]。有限元法在开采沉陷领域应用较广，积累了丰富的经验，有很多成熟的计算软件，如 SAP^{2D}，它是加拿大学者研究出的一种较好的应用于二维开采塌陷计算的有限元程序系统^[62~64]。P.L.Meyer 给出了适用于求解岩石力学平面问题的非线性分析程序 NCP-1^[65,66]。国内西安矿业学院针对采矿工程开发了 NCAP 系列程序^[67]。2 σ 、3 σ 分析软件是由日本软脑株式会社开发的有限元分析软件，此系统尤其适用于复杂的土木和矿山分析问题(如阶段施工、挖掘、开采、支护等)。ANSYS 是 SASI 公司开发的世界最著名的大型通用有限元分析软件，以其极高的性价比和无以比拟的解题广度和深度，广泛应用于土木工程、航天、地矿、水利等各个领域，极强的分析功能覆盖几乎所有的工程问题^[68]。

随着计算机技术的飞速发展，数值模拟技术也取得了长足的进步，已被证明是解决相关的复杂岩体力学问题的一种十分有效的手段，数值模拟也成为目前进行采空区稳定性分析研究和应用最多的方法之一^[69~73]。

1.3 课题研究的目的是和意义

栾川钼矿是全国最大的钼矿生产基地之一，国家曾投巨资进行了重点建设。但是，由于以前该矿山采用地下开采的方式，现以地下开采转为露天开采，由于地下开采留下很多空区没有及时进行处理，导致地下空区对露天开采带来了严重的安全隐患。因此、栾川三道庄矿地下空区的处理是矿山管理人员的一件大事，本文针对矿山的实际情况对空区进行可视化研究，研究结果给矿山处理空区提供指导性意见。

从 2007 年 3 月至今，河南省洛钼集团有限公司和中南大学合作，以“复杂采空区激光三维探测技术”课题为依据，在国内首次采用国际先进的地下矿采空区探测系统(Cavity Autoscanning Laser System, 简称 C-ALS)，完成了栾川钼矿地下采空区的探测工作，并借助大型矿山工程软件 Surpac 等工具，精确地获得了空区的三维形态、实际边界、顶板面积和体积大小，取得了理想的空区探测及其成果的实际应用效果。本文就是在此研究工作的基础上，结合大型工程三道庄矿地下采空区形态精密探测、矿山三维建模和数值模拟，开展基于实测的地下采空区稳定性数值模拟分析研究。

众所周知，采空区的实际三维形态和准确的空间位置是影响空区稳定性数值模拟结果准确性的关键因素。目前，在对空区稳定性进行数值模拟时，往往将采空区的形态视为空区形成之前即开采前进行采场设计时确定的规则形态，部分则

是依据传统的测量方法测定的简化空区形态进行模拟计算。然而,采空区的实际形态往往在实际开采过程中,因爆破等因素的影响而呈不规则状,加之采空区形成后受爆破震动的影响,以及空区围岩的冒落、片帮,致使空区的实际形态和开采设计中确定的相差甚远。这就势必严重影响空区稳定性数值模拟结果的精度和可靠性。因此,如何精确地确定空区的实际形态和空间位置,并以此为基础建立准确的空区计算模型进行数值模拟计算分析,是空区稳定性数值模拟研究中应加以解决的一个重要问题。

本文针对上述问题,开展以精密探测获得的空区实际三维形态和空间位置为基础的空区稳定性数值模拟研究,形成一种新型的基于空区实际三维形态精密探测的空区稳定性数值模拟技术,以提高数值模拟结果的精度和可靠性,并结合工程项目,将所形成的技术应用于栾川钼矿采空区稳定性数值模拟分析中,以验证其可靠性和可行性。

1.4 主要研究内容和技术路线

1.4.1 研究内容

本文针对目前国内外对采空区稳定性进行数值模拟研究中存在的问题,结合大型工程项目“栾川三道庄矿地下采空区激光探测技术研究”,综合运用岩石力学、空区精密探测系统(C-ALS)、大型矿床三维建模软件 Surpac 及大型岩土工程数值模拟分析软件 FLAC^{3D} 等手段,开展基于空区形态精密探测的空区稳定性数值模拟多手段耦合技术的研究和应用,主要研究内容和方法如下:

论文共有六章节内容组成:

第一章 绪论

阐明本文研究课题的由来、研究目的和意义,在对国内外相关研究的现状进行了综合评述的基础上,提出了本文研究的主要内容和方法,并拟定了研究技术思路。

第二章 矿山地质

在建立矿山三维模型前,必须对矿山的地质资料进行有效的收集,确保建立的三维模型与事实相符;并且了解矿山的采矿方法、露天坑境界和矿体最终开采的水平等有关地质资料。

第三章 矿山三维模型的建立与矿量计算

在收集大量的地质资料后,运用大型的矿山建模软件 Surpac 建立整个矿山的的地表模型、露天坑模型和矿体模型,从空间角度了解矿体与地表、露天坑的三维关系;并建立矿体的块体模型,从矿体的块体模型中可以直接了解矿体的品位分布情况,从而减少矿体在开采过程中的损失率和贫化率。本章最后计算矿山的总矿量和剩余矿量,并按品位进行分量计算。

第四章 采空区探测与三维模型的建立

阐明采空区激光探测系统（C-ALS）的基本构成及工作原理，利用（C-ALS）系统有强大的后处理能力，得到空区三维模型。采空区三维实体模型的构建能够清晰的反映空区的形状、大小和位置。然后把探测的空区模型和整体矿山三维模型结合起来，从而清晰的反映空区与矿体、露天台阶的位置关系，为矿山工作人员治理空区提供有效的资料。

第五章 采空区的数值模拟与力学分析

运用 Surpac 软件中的切面功能在模型中切取了 1438 水平和 1414 水平两个空区所在的剖面导入 FLAC^{3D} 数值计算软件中进行应力应变的分析，了解地下空区对露天台阶剥离的影响，分析空区顶板的稳定性。

第六章 结论和展望

对本文所做的工作进行总结，并对进一步研究提出设想。

1.4.2 主要研究技术路线

本文的主要研究技术路线如图 1-1 所示：

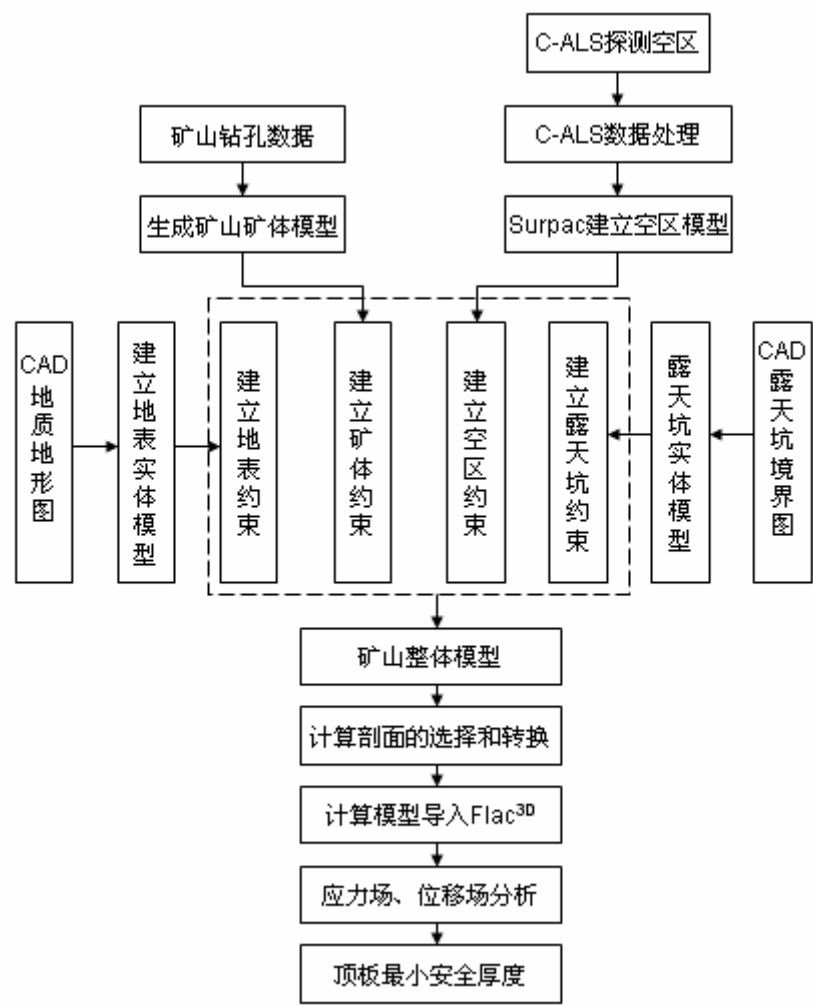


图 1-1 研究技术路线图

第二章 矿山地质

2.1 概况

为了查清洛钼集团三道庄露天矿坑底采空区的相关情况,分析空区顶板围岩应力、应变和位移分布情况,调查并摸清目前矿区区段内露天开采坑底内存在的采空区的位置、形状、大小、规模等。在此基础上,运用 Surpac 软件对采空区在整个矿山模型中的可视化,了解空区在露天矿的具体位置,从而确保矿山能安全进行生产,以及采空区的勘测工作受地质地形、矿岩物理力学性质及矿山施工等因素的影响,为了准确获得采空区数值模拟力学参数和矿山的地质地形资料,首先要对矿山的地质资料要有一个全面的了解。

洛阳栾川钼业集团有限责任公司(简称洛钼集团)是以采、选、冶、深加工为主的国有大一类综合性有色冶金企业,隶属洛阳市管辖,从事钼矿的经营已有 30 年的历史,其下属的矿山公司负责三道庄露天采场的开采。三道庄露天采场由 8000t/d 扩建到现在 30000t/d^[74]。三道庄矿区因历史原因,经历了二十余年不合理的地下开采,在现有矿山露天开采境界内,既存在有大规模分段凿岩阶段落矿空场法留下的大空区;也存在有为数众多且大小不详的民采空区。这些采空区形态十分复杂,千奇百怪,在空间位置上层层叠叠,高低不同,致使整个矿体千疮百孔,给矿山露天开采带来极大的安全隐患与危险。

随着露天开采坑底临近采空区,矿山迫切需要探明其坑底内的采空区位置、大小等情况,以便确定出露天开采时人员、设备作业安全的隔离层厚度,并对可能塌落的采空区位置与范围进行科学判断,对露天开采中存在的危险提出警戒和预报,为井下采空区综合治理提供准确的数据资料,从而尽可能减少或完全消除作业人员及设备在采空区陷落的危险,最终确保露天开采人员及设备安全万无一失。

三道庄钼矿区的开采已有三十年的历史,七十年代至八十年代初期,先以小规模国营进行地下开采;八十年代中后期出现无序地下民采;九十年代形成以乡镇和集体企业进行的乱采乱挖现象。三道庄 5000t/d 露天采场于 1991 年进行基建,1998 年底建成投产,生产规模 5000t/d。2000 年在 15 线实施基建在爆破,2001 年底已形成 8000t/d 生产能力。截止 2002 年底,露采已采出矿石量 745.8 万吨,平均出矿品位 0.152%,剥离岩石量 6048km³。截止 2006 年底,矿区的生产能力为 30000t/d,钼的平均品位 0.23%,已形成 10172km³地采空区,地采空区主要分布在 1160-1364m 标高^[75]。

2.1.1 地理交通位置

三道庄矿区位于河南省栾川县境内，隶属冷水、赤土店乡，矿区东南至县城 30km，东北经嵩县至陇海铁路洛阳站 160 km，西北经卢氏至灵宝车站 135km，均有公路相通，交通方便。洛钼集团隶属洛阳市管理，洛钼集团下属的矿山公司负责三道庄露天采场的开采。栾川地区山区面积大，地少人多。农作物主要为玉米、小麦、大豆、土豆；经济作物主要为核桃、药材、蘑菇。栾川地区资源丰富，目前主要开发钼、金、铅锌等矿床，矿山企业的发展是振兴栾川地方经济的一个经济增长点。

2.1.2 地质资源

三道庄矿区矿体厚大集中，矿体走向长约 1500m，宽度约 1000m，厚度一般为 80-150m，呈平缓的似层状透镜体产出。根据河南省储量审查委员会 1984 年 7 月(1984)第 02 号决议书，批准的 B+C+D 级地质储量(不含下层矿)为 529849.6kt，Mo 的地质品位为 0.115%， WO_3 为 0.121%，Mo 的金属量为 809327t， WO_3 金属量为 812946t^[75]。

2.1.3 水、电供应状况

供水：矿区地处秦岭东端的伏牛山与熊耳山之间，矿区内三道庄岭为长江、黄河的分水岭，矿区范围地形高，地表水资源缺乏，三道庄露采用水水源从冷水抽取地下水供给。

供电：洛阳栾川钼业集团现已建成的姚院总变电所主要负责太堡山选矿、三道庄露天采场的供电。姚院总变电所内装有 2 台 35/6KV 主变压器(6300+3150KVA)，目前尚有 1500KVA 的供电富裕量。三道庄露采现有 6KV 配电所一座，自姚院总变电所至露采配电所已架设规格为 LGJ-70，长度约 3.5km 一回架空线。从 6KV 配电所已架设一回 6KV 架空线至露天采场，向露采供电[92]。

2.1.4 气象条件及地震烈度

矿区属大陆性气候，夏季凉爽，冬季严寒，最高气温 31°C，最低气温-15°C，七、八、九月为雨季，年降雨量 654-804 mm，十月至来年四月为降雪期，十一月至来年二月为冰冻期，冻土深度一般在 200 mm。当地地震烈度为 5°^[75]。

2.2 矿区及矿床地质特征

矿区位于秦岭纬向带东端，受伏牛~大别弧型构造的干扰影响的向南拖移呈弧形转折的部位。区内地层、构造、变质带及岩浆岩均呈北西西~北西向分布，反映了纬向带雄伟壮观的形变图象。本区自晚元古代以来，经历了多次地壳运动，又由于伏牛~大别弧及新华夏系构造的干扰和影响，不同方向，不同性质，不同时期的构造形迹广泛发育，断层结构面有过多次数力学性质的转变，造成了区内错综复杂的形变图象。

2.3 矿床水文地质及开采技术条件简述

三道庄矿区于 1956 年发现, 1957 年 10 月普查, 1970 年初探, 1974 年 4 月由河南省地质队详探, 1980 年 8 月提交地质报告^[76]。

矿区位于三川~栾川陷褶断带构造线方向上由北北西转向北西的弧形转折处和新华夏系构造的复合部位, 受青和堂~庄科背斜的西北倾伏端次级构造即南庄口~三道庄岭箱形背斜所控制。区内围岩蚀变复杂, 分布范围广。主要矿体呈扇形产于岩体外接触带三川组上段的矽卡岩、钙硅酸角岩及南泥湖组中下段的长英角岩及黑云母角岩中。主矿体形态简单, 为厚大似层状矿体, 在主矿体上下部位有少量零星矿体分布。矿体的总产状为走向 $280^{\circ}\sim 310^{\circ}$, 倾向南西, 箱状背斜轴部为 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$, 两翼倾角 $40^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 。矿体规模巨大, 主矿体长度大于 1420m, 倾向延深大于 1120m, 厚度为 80~150m, 最大厚度为 346.56m, 平均厚度为 125.56m。主要工业矿体分布于 4~17 线, XⅧ~XⅩV 纵线范围内。钼矿表内金属储量 66.07 万吨, 伴生矿产钨金属储量 50.24 万吨, 伴生组份硫(黄铁矿)储量 397.67 万吨, 铼金属储量 24.42 吨。此外还有钼表外矿金属储量 11.11 万吨, 平均品位 0.041%; 钼氧化矿金属储量 3.65 万吨, 钨金属储量 0.88 万吨, 伴生硫储量为 145.26 万吨。

区内主要地层有: 下元古界及太华群(Pt₁、An、Z)、下元古界宽坪群(Pt₁)中元古界和新生界(KZ)。主要地质褶皱构造有北西西~北西向构造形迹、北东向构造形迹、北东~北东东向构造形迹和北西西向构造形迹。

主要矿石矿物有黄铁矿、磁黄铁矿、辉钼矿、白钨矿等。主要有用矿物为辉钼矿、白钨矿。脉石矿物有钙铁榴石、钙铝榴石、钙铁辉石; 次要矿物有石英、黑云母、阳起石等; 少数的萤石、方解石、符山石、角闪石、沸石等; 微量的磷灰石、榍石、锆石、褐帘石等。矿石结构为片状、束状、放射状结构, 自形一半自形状结构, 镶嵌结构, 包体结构, 交代残余结构, 充填结构, 它形粒状、胶状结构, 充填胶状结构, 以前三种为主。

矿石构造有: 稀疏浸染状构造, 细脉状构造, 角砾状构造。

矿石类型有: 矽卡岩型矿石, 透辉石斜长石角岩型矿石, 长英角岩型矿石, 斑状花岗岩型矿石, 变细晶正长岩型矿石。

三道庄矿区地处黄河与长江两水系地表分水岭的脊部地带, 分水岭东侧的三道庄沟流入马圈河, 属黄河水系伊河支流; 西侧南泥沟与大东沟汇合流入冷水河, 属长江水系浚河支流。矿区内有间隙性水流。

矿区主要岩石裂隙含水有: 第四纪松散岩石与基岩风化岩石裂隙水、石英岩及长英角岩裂隙水、大理石及矽卡岩裂隙水、石英片岩裂隙水。

主要隔水岩石有: 辉长岩、花岗斑岩、变细晶正长岩。

断裂构造带岩石含水经坑道揭示, 绝大部分岩石干燥无水, 雨季偶有滴水, 大气降雨是地下水惟一补充, 矿区水文地质简单。

露天采场的预测涌水量为：

20 年一遇时露天采场的一次连续最大流入量：Q1=24682 m³/d；

50 年一遇时露天采场的最大日流入量：Q2=168208 m³/d；

100 年一遇时露天采场的瞬时最大流入量：Q3=65425 m³/h；

矿区山坡地表岩石裸露，山坡角一般大于 35°，有利于地表水排泄。由于坑采降低了露天采场边坡水位线，因此地表水、地下水对边坡影响较小。

三道庄矿岩稳固，岩石硬度较大，f 系数一般为 14 以上^[76]。

矿区矿岩物理力学性质如下表 2-1、表 2-2 所示。

表 2-1 三道庄露天矿矿岩物理参数表								
岩 石 名 称	取样高度 (m)	比 重 (g/cm ³)	风干容重 (g/cm ³)	总孔隙率 (%)	体积吸水率 (g/cm ³)	小体重	大体重	备 注
大理岩	1366	2.82	3.06	1.1	0.82	2.86	2.65	
矽卡岩	1366	3.61	3.43	4.8	1.93	3.28	3.38	含钼矿较多
硅灰石角岩	1366	3.28	3.19	6.1	3.23	3.13	2.92	

表 2-2 三道庄露天矿矿岩力学参数表							
岩石	密度 (g/cm ³)	抗压强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	泊松比	抗拉强度 (MPa)	粘结力 (MPa)	内摩擦角 (°)
大理岩	2.82	83	0.3	0.22	2.16	15.7	34.1
硅辉石角岩	3.28	214	0.26	0.21	5.88	31.5	39.4
矽卡岩	3.61	191.5	0.32	0.21	8.73	24.9	37.7

三道庄露天矿位于海拔高度+1200m~+1600m、人口相对稀少的深山之中，峰谷起伏中等，地表森林植被茂盛，雨水充足。附近农田与村庄少，周围环境允许地表破坏，并且有足够空间设置排土场与尾矿库。矿体出露地表，采剥工程量少，是一典型的山坡露天矿。

2.4 采场构成要素与采矿方法

三道庄露天矿为山坡凹陷露天。

依照三道庄露天矿 5000t/d、15000t/d 设计说明书和设计修改说明书，露天开采台阶高度为 12m；终了并段台阶高度 24m；终了台阶坡面角 70°；清扫运输平台宽度 11.0m；运输台阶宽度 12m；15000t/d 最终边坡角东北角为 50°，其余地段边坡角为 53°。

洛钼集团有限责任公司三道庄露天采场设计分为 5000t/d 接替工程和 15000t/d 扩建工程^[77]。

5000t/d 露天采矿接替工程开采境界为纵 X V III ~X X V 线、横 5 ~ 11 线，上口最大尺寸长 550m，宽 830m，坑底长 290m，宽 320m，地面最高标高+1628m，坑底标高+1282m，最大高差 346m。境界内采剥总量为 $3.266 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中剥离量 5299 万吨，矿石量 4823 万吨，平均剥采比 1.1 t/t，平均地质品位钼 0.167%，钨 0.084%。

第三章 矿山三维建模的建立与矿量计算

通过对栾川三道庄钼矿的资料调查研究,收集了大量的基础数据,利用现代计算机技术,可以大大地减轻地质工作者的负担。目前,三维建模技术已经被应用到地质、矿产、水文、物探、地震、环境等各个领域。将三维建模技术应用于矿床地质研究,可以从矿体形态、产状、构造、类型、空间分布等方面直观、系统、科学地分析研究过程中遇到的疑难问题。三维可视化地质体建模技术是矿床地质学研究的前沿课题之一,其三维技术是真三维地理信息系统的应用和研究的拓展。它是在可视化技术的支持下,充分利用了真三维地理信息系统技术,通过矿床地质专家逻辑思维和形象思维的结合,通过信息的动态反馈来获得关于地学问题的科学解释。在矿床地质研究领域里,由于矿体构造的多样性、复杂性和实际信息的严重匮乏,建模过程中虚拟技术和人机交互式技术显得尤为重要。

3.1 三维模型可视化的优势

三维模型在矿床地质学中作为一个新技术加以运用,就是对地下矿体客观对象的模拟,它能够清晰地反映被研究矿体的主要构成因素间的相互关系。三维模型是依据前人所做工作获得的大量基础数据资料,按其主要特征加逻辑推理构建的,其作用是用三维的方式直观的展示矿体形态和产状。与传统的研究方法相比较,三维立体模拟具有以下优势:

(1) 能充分地将各种来源和不同格式的遥感、地球物理、地质工程(钻孔数据资料)、地球化学等数据资料紧密地结合在一起,从而充分发挥各种资料的价值。更快、更精确、更完整的解译地质基础数据,并根据所得出的认识支持决策,将三维立体可视化技术引入地质研究中,有助于促进矿床地质学研究的进一步发展。

(2) 能对矿体的空间形态、产状、相互关系有更好的理解,因为我们对地下矿体的认识不再是二维的、局部的概念,而是从三维空间整体上认识,旋转三维模型及改变观察三维模型的视角,探视模型的内部结构,使地质和采矿工作者从全新的、不同的角度来观察地质结构中熟悉和陌生的区域,以及在现实中不可能看到的区域(地下矿体)。

(3) 能在三维模型的基础上任意生成剖面,减少工作量,快速生成所需图件,这在理论研究和矿山实际工作中具有非常重要的指导作用和现实意义。

计算机屏幕的彩色作图功能是模拟矿体或地表的极好手段。用钻孔和其他定义矿体的数据连成线段,构成网格状或实体的三维矿体模型;用不同的色彩表示

不同的品位或不同的岩石；利用软件的旋转、放大和缩小功能，可以从不同的视角观察矿体各个位置的几何形态，可以很清楚的看到局部细节和不易发现的部位。同样，也可以用三维手段模拟地貌和地质结构面（如断层）等，以便对复杂的问题做出正确的判断。同时，还可以方便地获得矿体任意方向和位置的剖面图，为做更进一步的研究工作提供信息。矿体三维可视模型技术的应用，可以为研究人员提供全新的视觉空间，寻找更有力的决策依据，促进矿床地质研究的进一步发展，对实际生产也具有重要的指导意义。根据矿体的三维空间形态，勘探工作可以做到有的放矢，并且随着勘探工作的深入，不断补充新的数据资料，可以方便地存储和管理数据，使地质体的三维模型的形态更接近实际情况，可以为下一步布置勘探工作提供决策性依据。所以，三维建模技术的应用，对矿床地质学研究和矿产勘探将会起到非常重要的作用。

3.2 矿山地表模型的研究与建立

三维矿山模型中，如果缺少地形模型是不完整的，地形模型对矿山露天开采的重要作用是不言而喻的，对地采的矿山也同样重要，地下矿山的三维模型中如果没有地表模型所切制平面图、进行采矿工程设计等应用不可想象的。栾川三道庄钼矿是露天开采的矿山，建立地表模型非常重要的，通过矿山的地表等高线能够把地表模型建立出来。

3.2.1 地形建模研究与栾川三道庄矿地形模型的建立

建立地形模型和建立矿体、露天坑、岩体的实体模型不同，矿体和岩体的实体模型一般要求是封闭的（或体状，封闭的线框面），而地形模型则没有必要封闭或没必要建立成复杂的类似矿体的体状实体模型，而只须建立成面状的实体模型就足以表述地形特征。

矿山的地形是千差万别的，而且地形的测量信息和数据形式、详细程度也是各不相同的。比如，对于新建的矿山，可能拥有的地形资料比较少或资料残缺不齐；对于老的矿山企业，资料比较齐全；另外有的矿山位于比较偏僻的深山中，地形陡峭复杂，而有的矿山位于平原或沙漠，地形比较平坦；对于栾川三道庄矿来说，该地区地形复杂，所以建立地表模型存在一些技术上的问题。针对这些不同的情况应该采用不同的方法建立地表模型，而不用教条地使用三维矿业软件系统提供的基本建模工具。本文在分析 Surpac 建立实体模型的机理基础上，根据地形特点、地形信息的详细程度、数据类型和数据量等，总结出三种建立地形模型的方法：

（1）简单趋势面法：地形形态简单，平坦，有关地形的测量数据很少或遗失，或只有钻孔的孔口高程可以利用来建立地形模型。对于这种情况，可以通过很少的测量数据和钻孔的高程，简单的构造地形的趋势面就可以满足要求，通常

采用距离幂次反比法来插值,之后再使用趋势面分析处理。但是该方法建立起的模型与实际的地形有很大的区别,误差很大。

(2) 数字化仪法:地形形态有起伏,但变化不大,比较平缓,无断崖等复杂地貌:有测量数据或地形图,遗失的数据不多;这时,构造简单的趋势面可能和实际的地形不相符,还必须通过钻孔的孔口高程矫正及修改,共同建立地形线框模型。一般情况是通过数字化仪输入已成图的小比例尺或大比例尺地形图中的等高线,然后利用输入的等高线(线串)生成地形实体模型。这是通常建立地形实体模型最常见的方法。

(3) 综合法:复杂地形,山势陡峭,如果测量的数据不足,则无法建立正确的地形模型。这种情况不但要求较大比例尺的地形图,而且要求相应的测点数据。这样数据输入系统后,首先建立实体模型,之后在三维视图环境下检查地形是否合理(重叠、交叉、错误连接),再交互修改。

对于简单地形和复杂地形均可以使用建立复杂地形实体模型的综合法,以使建立的地形模型更精确、更逼真,但有时设计并不要求如此高精度的地形模型。但是,使用建立简单地形线框模型的简单趋势面法来建立复杂地形的实体模型是不可取的,否则建立的模型肯定和实际出入很大,必须用综合法建立复杂的地形模型。

另外,一些矿业工程系统(如 Surpac)提供有如 ARC/INFO 等 GIS 的接口,它可以直接装入由 GIS 建立的地形模型或数据,快速建立准确的矿山地形线框模型。GIS 在地形建立方面提供了很多成熟、优秀的方法,通过 GIS 建立的地形模型精确度很高。利用 GIS 建立地形模型一是可以节省在地形模型方面的开发费用,二是可以使用户建立更精确的矿床模型。此外 Surpac 还提供了“DXF 文件至线/DTM 文件”接口(如图 3-1),这为许多矿山能够直接将常规 CAD(如 AutoCAD)下所建立的矿山地形图文件(.dxf)导入 Surpac 进行地形建模提供了极大的方便,即减少了数字化仪输入的工作量,又克服了数字化过程中产生的误差。

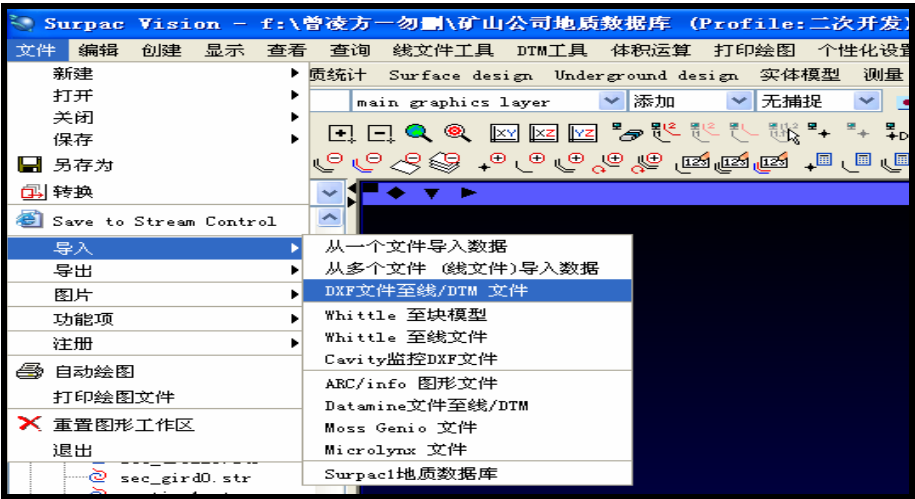


图 3-1 DXF 文件至线/DTM 文件方法

本文的地表模型是采用栾川钼矿提供的地质地形图，对矿山地质地形图中的等高线进行提取，再在 Surpac 系统下进行地形图的数字化，在使用过程中，发现在进行数字化输入时易导致一些错误，必须对这些误差线进行修正，修正采用人机交互的方式直接修改（移点、删去冗余点等操作），修改完后保存这些等高线（线串），然后对所有的等高线进行赋值，修正后的等高线才可以用于建立地形线框模型。由于栾川钼矿地测科对原来的地表模型进行了数字化，于是本研究就放弃了原有的数字化工作，而是直接将测绘成果（.dxf）文件导入 Surpac 进行地形建模，建好的地表模型线文件如图 3-2 所示，形成的地表模型（DTM）如下图所示 3-3 所示。

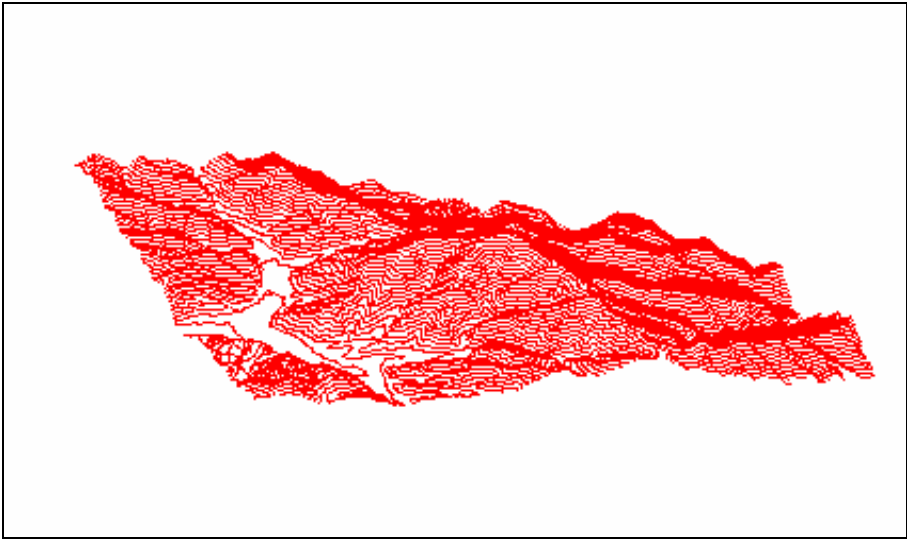


图 3-2 地表模型的线文件

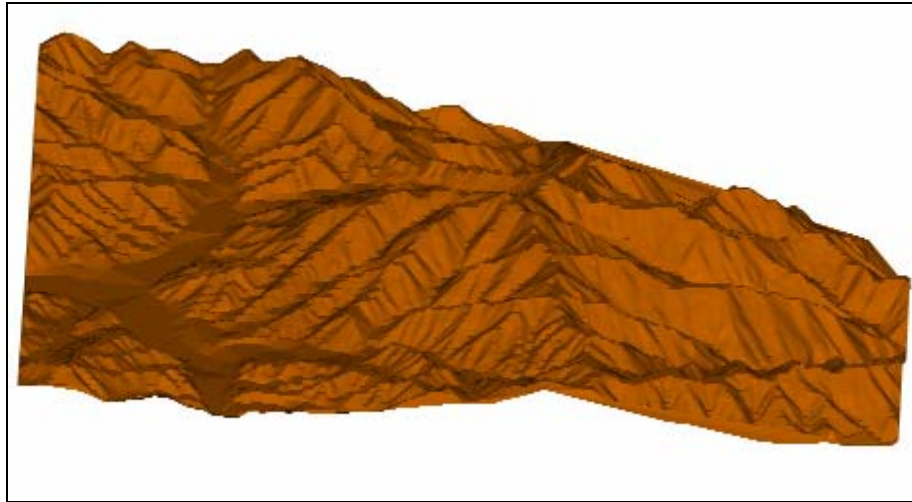


图 3-3 地表模型 (DTM)

3.3 露天坑模型的研究与建立

3.3.1 露天坑三维模型的转换

将露天坑的三维数据文件格式转换成 Surpac 系统的线文件数据格式。Surpac 是三维的采矿软件，它要求输入的数据必须是三维数据。目前露天采矿境界图常用 CAD 图，并且 CAD 图件大多数是二维数据，其数据主要是从矿山测量科得到的，如果将测量验收提供的 CAD 格式的平面数据直接导入到 Surpac 中，还必须对二维数据进行高程值编辑和处理，这样的工作量是比较大的。

栾川三道庄矿露天坑三维模型的设计是在原有的 CAD 二维数据的基础上，加上三维的高程，再将露天坑三维数据转换成 Surpac 格式数据作为采矿计划的三维露天坑数据。这样就减少了将二维数据处理成三维数据的繁琐过程。

3.3.2 露天坑三维数据的检查

通过转换得到的三维露天坑数据还存在许多问题：如有重复线、孤立点、台阶线零碎不完整等，这在 Surpac 软件的环境中是不允许的，将无法建立起露天坑的表面模型，需要在编辑环境下利用检查工具对这些数据进行检查和处理。处理方法是：编辑→层（或线）→清除，进入处理选择界面，可以选择对重复线、重复点、交叉点等直接清除或做出标记供人工处理在 Surpac 编辑的工作环境下操作。

3.3.3 露天坑三维模型的建立

根据转换的三维露天坑数据和地形数据，生成露天坑表面模型 (DTM)。之后需要将出露的矿体模型进行剪切，否则矿体实体将暴露在开挖的矿坑面模之上。在建立露天坑模型的过程中，随着开采深度增加，露天台阶的数量也会随着增多，露天坑的范围也会增大，这就需要根据地质测量人员在每次露天台阶扩展后，把测量的数据导入 CAD 中，然后导入到 Surpac 软件中，这样露天坑的境界

基本上每一段时间就要发生一次变化，变化主要取决与矿山对露天矿的剥离量。在设计露天坑的三维模型过程中，还需要考虑各种设备的行驶路线，图 3-4 是建立的露天坑的线文件图，将线文件生成实体模型如图 3-5 所示。

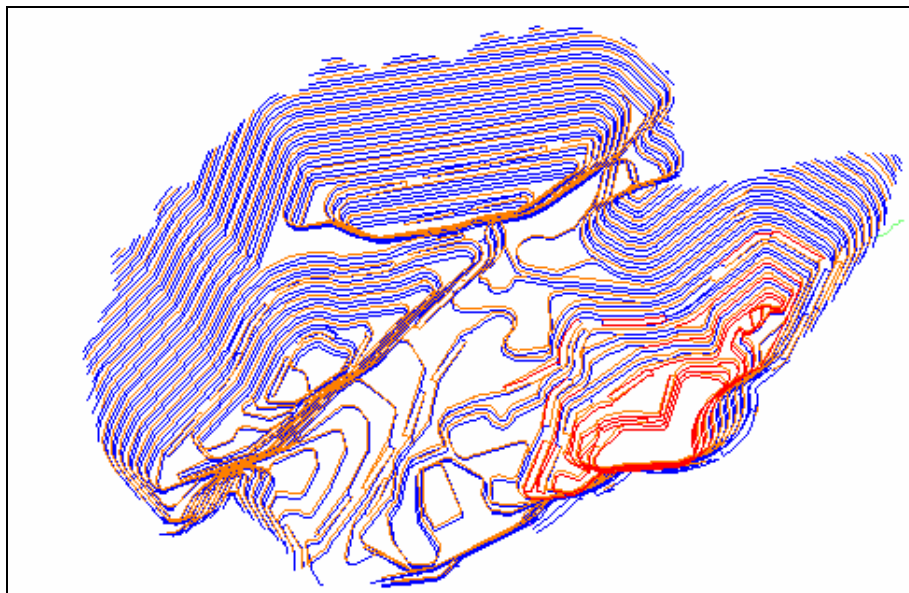


图 3-4 露天坑的线文件图

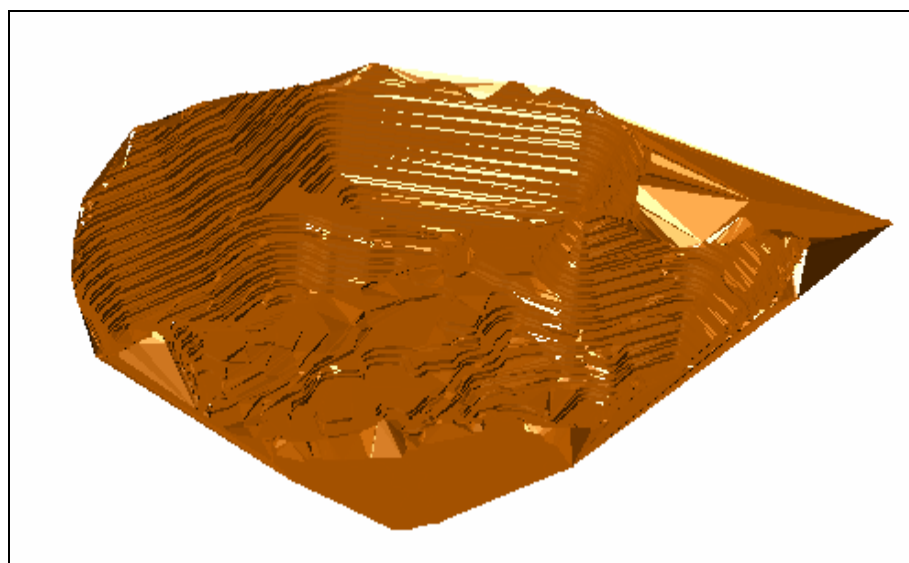


图 3-5 形成后露天坑的实体模型

3.4 矿体模型的研究与建立

矿体三维空间模型依据三维空间几何形态划分为三维空间的点、线、面或体四种不同的几何对象类型，每一几何对象又由若干个点、线、面几何元素构成。面是由若干的线和点构成的，而每条线又至少包含两个以上的点，在线与线、线与点之间联结三角网就形成面。每个子矿体对象由若干个面圈定范围，所有子矿

体组合形成矿体三维模型。创建了钻孔数据库，也就提供了建立矿体三维可视化模型的基础。Surpac 软件提供了交互式完成三维模型的创建工具。创建三维矿体模型首先从剖面着手，完成矿体在剖面的形态，根据前人已有的资料，利用矿体在勘探线剖面的投影形状，构建其空间的大致赋存形态，Surpac 软件系统根据拓扑关系原理，在计算机上根据剖面交互式圈定矿体形态，完成立体模型的建立。

建立矿体的三维模型，是通过矿体相关数据的输入及提取，完成矿体的绘制过程，实现地下矿体的三维显示，既可以体现其几何形态，也可以表达其物理属性特征；既可以从全局的角度展示矿体的整体形态，也可以局部缩放，还可以任意旋转或剖切。模型的建立与矿区大量的基础地质工作分不开，这些基础数据有效的控制了矿体的空间赋存规律。栾川三道庄矿床矿体三维模型是依据栾川三道庄提供的勘探线剖面和几十个钻孔的数据资料的建立。这些基础地质数据资料有效的控制了矿体的定位、边界、空间形态和相互关系，为建立矿体的三维模型奠定基础。

3.4.1 钻孔数据库的建立及可视化

建立数据库，首先要建立原始数据表，这是数据交换的前提。数据表包括多项记录，而每一项记录又包括多个信息段。数据库中的原始数据来自勘探线剖面图中的取样分析成果表。按照软件对数据格式的要求，把这些数据录入计算机。在 Surpac Vision 地质数据库中，文本文件也是 ASCII 文件，但是数据在这里被指定了特定的方法，文本文件的每一列符合数据库中的一个记录，字段符合文件的行，一般说来，文本文件和数据库中的每个表对应。这种固定格式的文本文件有特定的行编号，也可以用自由的文本格式来限制行列之间的范围，每个记录中间用逗号来隔开。文本文件的创建有几种方法：

(1) 在电子表格或者数据包中输入数据 (e.g.、Microsoft Excel、Lotus123 Dbase)。

(2) 以 word 格式输入数据，数据中间用空格来隔开。

(3) 使用 ASCII 编辑器 (e.g.、Norton、Editor、Brief、DOS edit、Word pad、Notepad) 来输入文本。

3.4.2 原始钻孔数据表

钻孔的原始数据来源于栾川三道庄地测科详细勘探地质报告中的 115 个钻孔的数据资料。首先把这些原始数据以文本文件的格式录入计算机。在这次的数据库的建立过程中，文本文件采用的是电子表格的格式。按照 Surpac 软件原始数据的导入格式，在 Microsoft Excel 分别建立以下三个表：

(1) 钻孔定位表 (collar. csv)：描述钻孔的空间总体位置信息，如表 3-1 (部分钻孔)。

(2) 钻孔测量表 (Survey. csv)：描述钻孔空间的位置变化信息，如表 3-2

(部分钻孔)。

(3) 样品分析数据表 (Sample. csv): 描述采样信息及地质描述, 如表 3-3 (部分钻孔)。

其中描述字段可多达 50 个, 以逗号分隔的* csv 格式保存。电子表格的具体格式如下图所示:

表 3-1 钻孔定位表

	A	B	C	D	E
1	钻孔标号	Y坐标	X坐标	Z坐标	钻孔深度
2	ZK109	5300.82	5748.23	1474.48	251.95
3	ZK209	5388.2936	5843.7364	1476.21	379.99
4	ZK309	5454.7	5917.91	1432.56	322
5	ZK409	5536.14	6002.14	1405.52	264.45
6	ZK1501	4935.5255	5358.3293	1472.38	260.38
7	ZK1601	4984.99	5443.52	1496.24	300.35
8	ZK1701	5050.59	5509.16	1537.63	251.46
9	ZK1801	5125.39	5587.96	1567.34	312.02
10	ZK1901	5185.41	5659.07	1517.33	290.84
11	ZK108	5185.44	5808.48	1524.2	284.91
12	ZK208	5336.89	5962.84	1525.89	431.75
13	ZK308	5421	6045.18	1444.77	346.98
14	ZK408	5461.01	6096.63	1400.32	257.41
15	ZK608	5268.07	5896.33	1536.54	305.22
16	ZK1903	5113.09	5731.29	1573.49	299.1
17	ZK1504	5068.85	5232.69	1531.81	301.66
18	ZK1604	5135.33	5304.13	1492.04	244.21
19	ZK1704	5206.95	5379.56	1496.18	224.76
20	ZK1804	5267.4	5453.11	1477.74	227.64
21	ZK1904	5334.23	5526.6	1476.47	300.39
22	ZK2004	5455.59	5621.4	1493.08	391.37
23	ZK2104	5527.94	5702.83	1425.9	356.62
24	ZK2204	5617.05	5786.81	1354.36	192.61
25	ZK707	5083.34	5852.81	1580.4	350.47
26	ZK107	5158.94	5928.5	1549.8	325.69

表 3-2 钻孔测量表

	A	B	C	D
1	钻孔编号	钻孔深度	钻孔倾角	钻孔方位角
2	ZK109	251.95	0	-90
3	ZK209	379.99	0	-90
4	ZK309	322	0	-90
5	ZK409	264.45	0	-90
6	ZK1501	260.38	0	-90
7	ZK1601	300.35	0	-90
8	ZK1701	251.46	0	-90
9	ZK1801	312.02	0	-90
10	ZK1901	290.84	0	-90
11	ZK108	284.91	0	-90
12	ZK208	431.75	0	-90
13	ZK308	346.98	0	-90
14	ZK408	257.41	0	-90
15	ZK608	305.22	0	-90
16	ZK1903	299.1	0	-90
17	ZK1504	301.66	0	-90
18	ZK1604	244.21	0	-90
19	ZK1704	224.76	0	-90
20	ZK1804	227.64	0	-90
21	ZK1904	300.39	0	-90
22	ZK2004	391.37	0	-90
23	ZK2104	356.62	0	-90
24	ZK2204	192.61	0	-90

表 3-3 样品分析数据表

	A	B	C	D
1	钻孔坐标	取样从	取样到	钼样品品位
2	ZK109	0	58.96	0
3	ZK109	58.96	61.85	0.027
4	ZK109	61.85	65.62	0.026
5	ZK109	65.62	69.21	0.014
6	ZK109	69.21	72.29	0.026
7	ZK109	72.29	76.08	0.023
8	ZK109	76.08	77.85	0.014
9	ZK109	77.85	79.77	0.01
10	ZK109	79.77	85.09	0.02
11	ZK109	85.09	100.15	0.01
12	ZK109	100.15	104.89	0.01
13	ZK109	104.89	108.92	0.01
14	ZK109	108.92	115.88	0.01
15	ZK109	115.88	118.85	0.056
16	ZK109	118.85	120.13	0.054
17	ZK109	120.13	122.94	0.06
18	ZK109	122.94	125.46	0.09
19	ZK109	125.46	127.63	0.03
20	ZK109	127.63	130.25	0.056
21	ZK109	130.25	131.58	0.11
22	ZK109	131.58	133.2	0.112
23	ZK109	133.2	134.9	0.076
24	ZK109	134.9	136.67	0.09
25	ZK109	136.67	137.67	0.184
26	ZK109	137.67	139.45	0.13

3.4.3 钻孔数据库的创建

根据以上三个钻孔原始数据表，建立钻孔数据库。首先打开菜单：数据库—打开 / 新建，在弹出的窗口中定义要创建的数据库名。点击执行后系统会要求定义数据库的类型，一般根据个人计算机安装的数据库类型来决定，由于 Microsoft Access 的广泛应用，这里选择计算型的 Access2000 数据库类型，接下来定义数据库中要创建的表，因为数据库存在三个基本表格 (Collar、Survey、Translation)，这里只选择创建 Sample 表和 Geology 表即可。然后为每一个表定义字段，在 Collar 表和 Survey 表的设置页面中，已经提供了全部字段，不再需要增加任何字段，其中的 Y、X、Z 字段不需要我们导入，Surpac 会根据长度、方位和倾角，自动计算各测斜点 Y、X、Z 值，这也是前面选择计算型数据库的含义。在 Sample 表的设置页面中增加 Mo（钼）字段对这两个字段的描述接受默认即可。

现在 Surpac 已经建立了一个以 Access2000 为后台的数据库，数据库的表和字段也已经全部定义好了，但是这只是一个定义了结构的空的数据库，该数据库中还没有任何信息。需要把前面建立的三个原始数据表导入数据库。

打开菜单：数据库—导入数据，在弹出窗口中输入格式文件名，一般与数据库名称一致，格式文件将会定义需要导入的表名称和字段名以及与原始表的列代号对应关系，为再次向数据库导入相同格式的数据表提供方便；执行后在弹出的窗口中选择需要导入数据的表和原始数据表中分隔符的类型，选项中 translation 表和 styles 表不需要数据导入，格式选择 FREE 是指原始表中的每一列通过定界符来隔离；下一步确定数据库中数据表与原始数据表的字段对应关系；最后对应地选择需要导入的原始数据表。导入数据完成后，可以通过数据库—编辑—查看表来验证数据导入是否成功。

至此，钻孔数据库创建完成。

3.4.4 钻孔的三维可视化

钻孔是山地工程的一种简称，它包含孔口三维坐标 (X、Y、Z) 以及钻孔的长度、钻孔的三维空间变化信息—空间延伸方向和倾角。在 Surpac 软件系统环境下可以用三维图形的方式展示钻孔的这些信息。钻孔数据库建立后，Surpac 软件可以利用数据库中的数据方便快速的显示钻孔的三维空间位置和形态，同时也可以显示样品的各种数据信息。点击数据库—显示—钻孔弹出绘制孔对话框。如图 3-6:

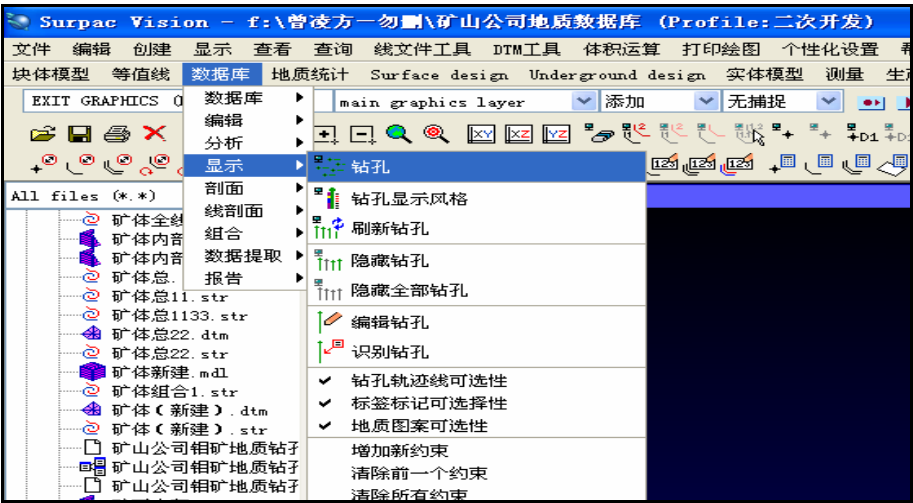


图 3-6 显示钻孔示意图

图 3-7 为钻孔三维展示。放大后可以看到钻孔的图形标注、文字标注及统计图表标注。由于在钻孔数据设计的过程中把矿石的品位进行了分级，钼的平均开采品位为 0.03%，所以把 Mo 的品位大于 0.000%而小于 0.030%设制颜色为白色，为废石；大于或等于 0.030%小于 0.060%设制颜色为蓝色，视为能过达到开采边界品位的矿石；Mo 的品位大于或等于 0.060%小于 0.120%设制颜色为紫色，品位在 0.12%至 0.20%之间的矿体，设定为红色，视为品位较高的矿石，品位大于 0.20%的矿体设置为绿色，为高品位矿体。三维钻孔中标有钻孔的最大深度，钻孔编号、矿体品位值等一些重要数据。

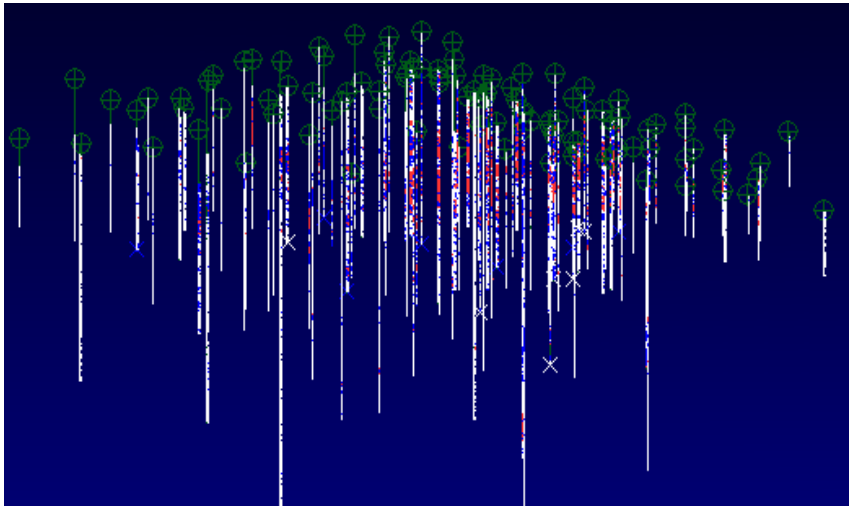


图 3-7 钻孔三维示意图

3.4.5 三维矿体模型的建立

在 Surpac 软件中建立三维矿体模型，一般来说，是通过前面建立的钻孔数据库来显示钻孔的三维空间形态。它是通过在 Surpac 中 XY 平面中确定一个剖面，在栾川的三维矿体模型的建立中，确定的剖面步距为 100m（也就是相邻勘

两勘探线的间距)。在每一条勘探线中,就可以通过钻孔数据清晰的看到矿体所在位置。再通过连接每一条勘探线钻孔上不同品位的矿体,形成一个闭合的矿体圈,如图 3-8,再把所有勘探线上不同品位的矿体连接在一起,就可以形成整个矿山的矿体模型。矿体模型如下图 3-9 所示。

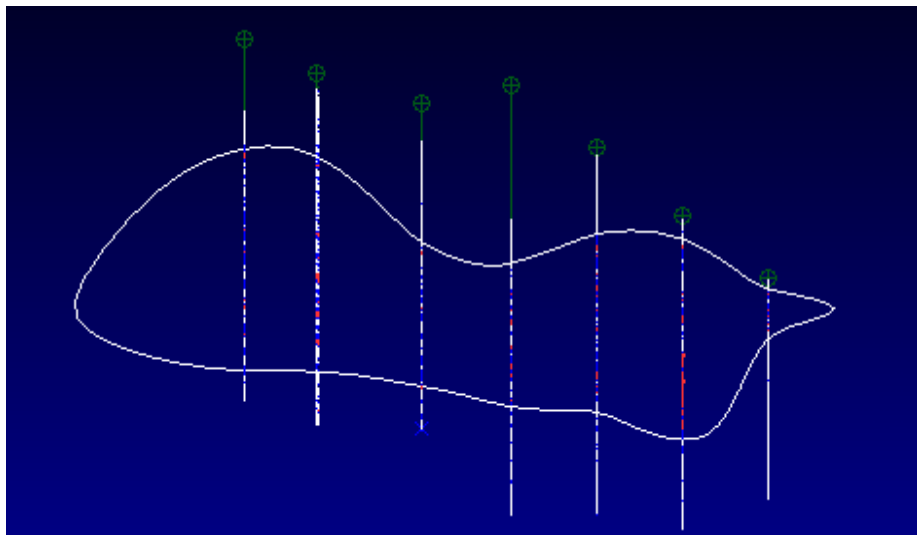


图 3-8 单独某一勘探线矿体闭合圈

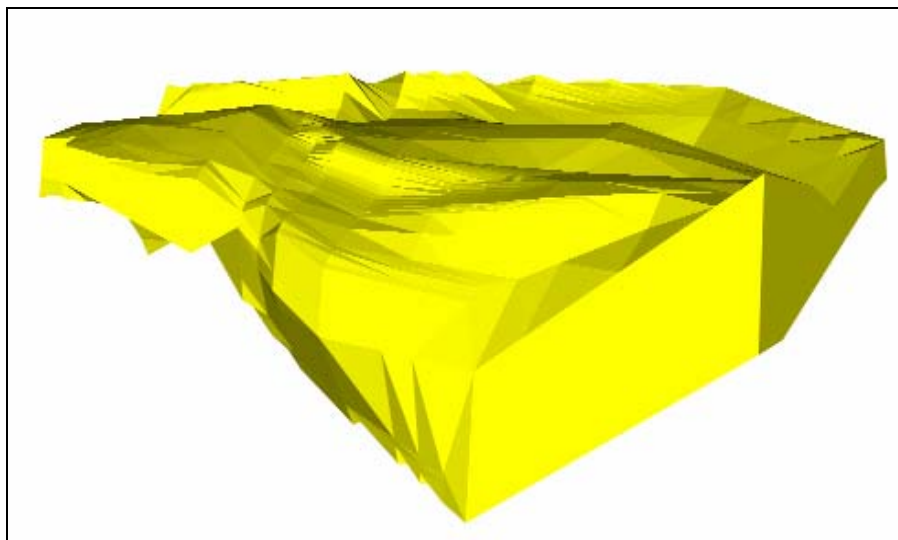


图 3-9 矿体三维图

3.5 整个矿山模型的研究与建立

在建立整个矿山三维模型时,需要把已经建立的地表模型、露天坑模型、矿体模型结合成一个整体,把它们在 Surpac 中显示出来。显示的结果下图 3-10 所示。

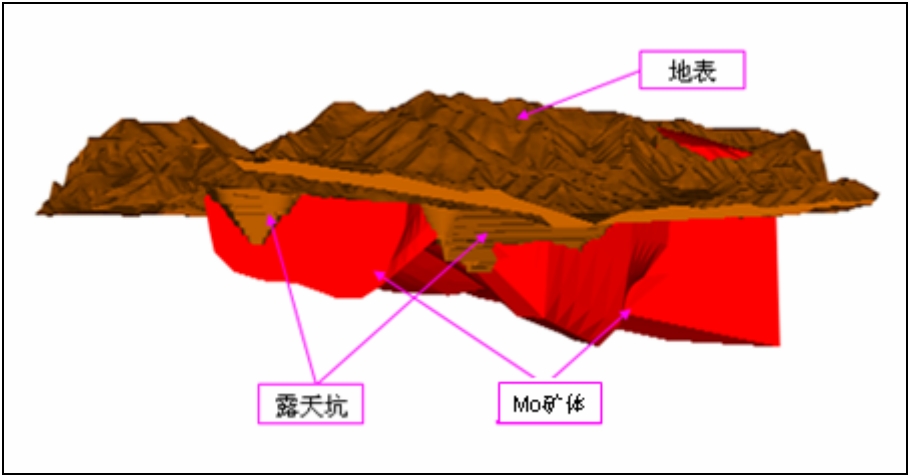


图 3-10 矿山整个三维模型的显示

3.6 矿体估值和品位的分布

建立好矿体模型后，对矿体估值是 Surpac 软件中一个强大的功能^[12,13]。所谓估值就是根据钻孔数据提供的钼的品位，通过软件内部计算，把矿体品位值分配到每一个建立好的块体模型中。在进行估值前，首先要对矿体内部的钻孔进行修剪，估值前只保留矿体内部的钻孔，如图 3-11 所示，并且在记事本中能够显示每一个钻孔在矿体中的始终的高程值。图 3-12 显示了每一个钻孔在矿体中的空间位置情况。

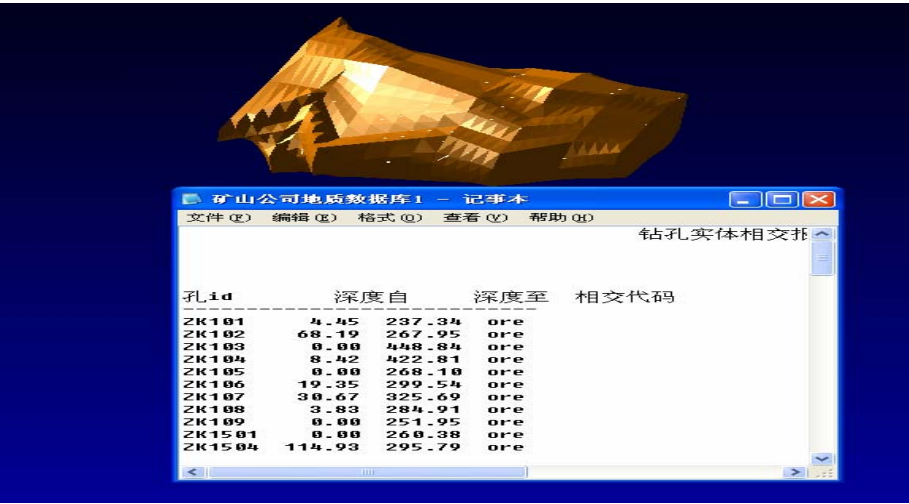


图 3-11 钻孔在矿体内部的坐标

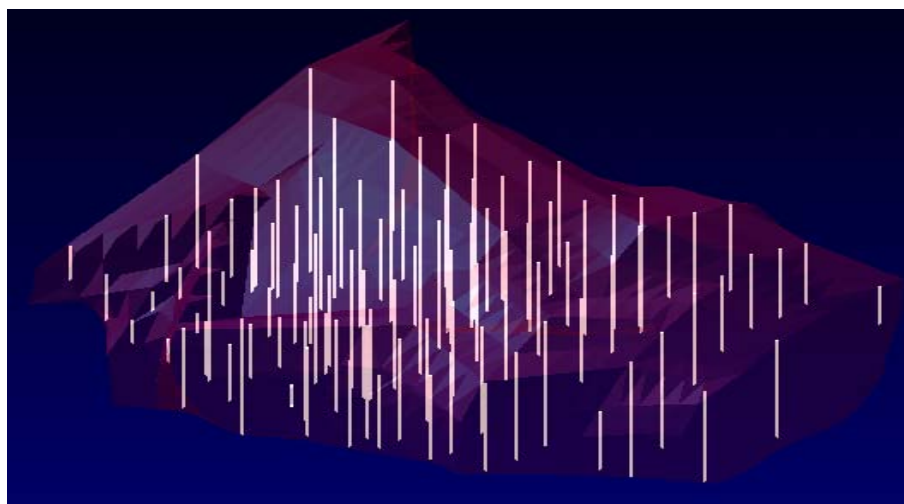


图 3-12 钻孔在钼矿体中的显示

在给矿体赋值前，必须将建立的矿体实体模型转换成矿体的块体模型，在建立块体模型之前确定矿体实体模型是有效的，然后在块体模型的菜单里新建块体模型，命名好新的块体文件名后，通过三维坐标网把矿体在三维空间中的最大和最小的坐标查询出来（包括 X、Y、Z），再定义块体的尺寸，本文定义块体的尺寸为 $50 \times 50 \times 25$ ，次级分块为 $25 \times 25 \times 12.5$ ，这样块体模型就建立好了。然后再在块体模型中新建图形约束，新建的约束有抗压强度、矿石比重、矿石硬度等等，之后可以查询矿体的一些岩石力学性质，如图 3-13。在建立好约束后，就要对矿体中的矿石品位进行组合，由于在取钻孔矿体进行化验时，取的样品有限，化验的数据也比较小，这样就不利于品位在模型中的显示，所以就把几个样品的化验数据组合成一个值，组合的原则是把几个样品的数据之和取平均值，如图 3-14 所示。在样品组合后，就按照不同品位给矿体进行着色，论文按照矿体品位在 $0.00\% \sim 0.03\%$ 、 $0.03\% \sim 0.06\%$ 、 $0.06\% \sim 0.12\%$ 、 $0.120\% \sim 0.20\%$ 、 $0.20\% \sim 1\%$ 五个等级给矿体进行分类，然后按照不同颜色分别给矿体进行着色，得到矿体的品位分布情况，其中矿体品位为 $0.00\% \sim 0.030\%$ 之间的认为是废石，如图 3-15 所示。

到目前为止，露天坑和矿体已经开采到的最终境界如图 3-16 所示，露天坑下部为余下的矿体。

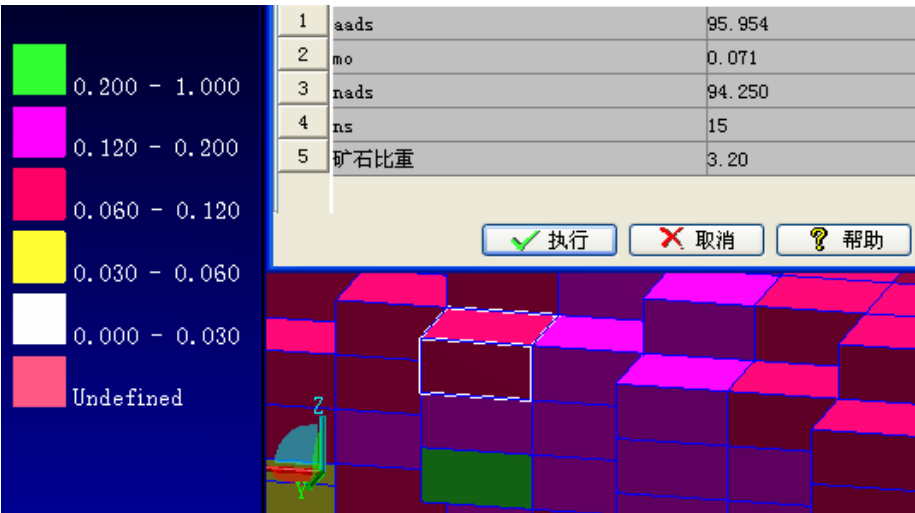


图 3-13 矿体中单个块体的力学性质和钼的品位情况

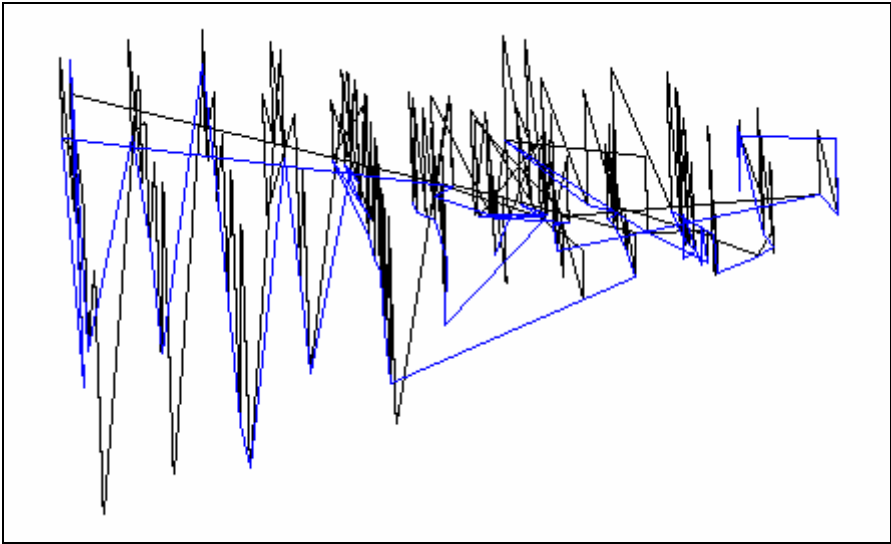


图 3-14 矿体品位组合情况

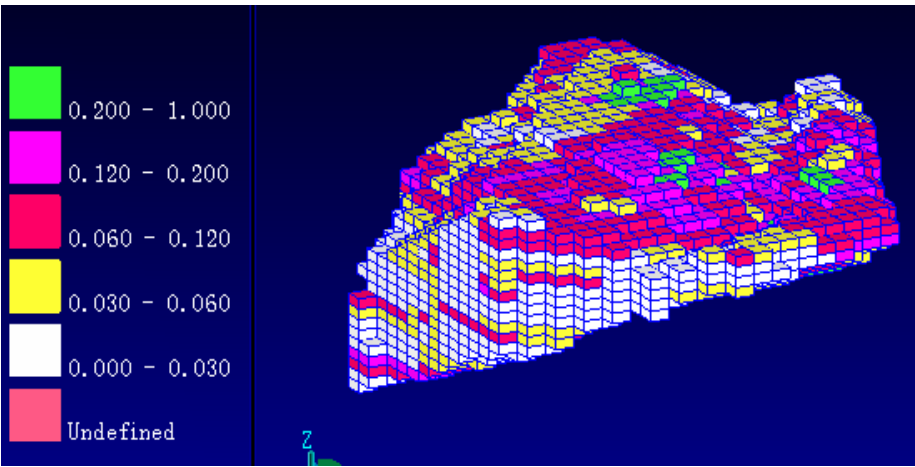


图 3-15 钼矿石不同品位的分布情况

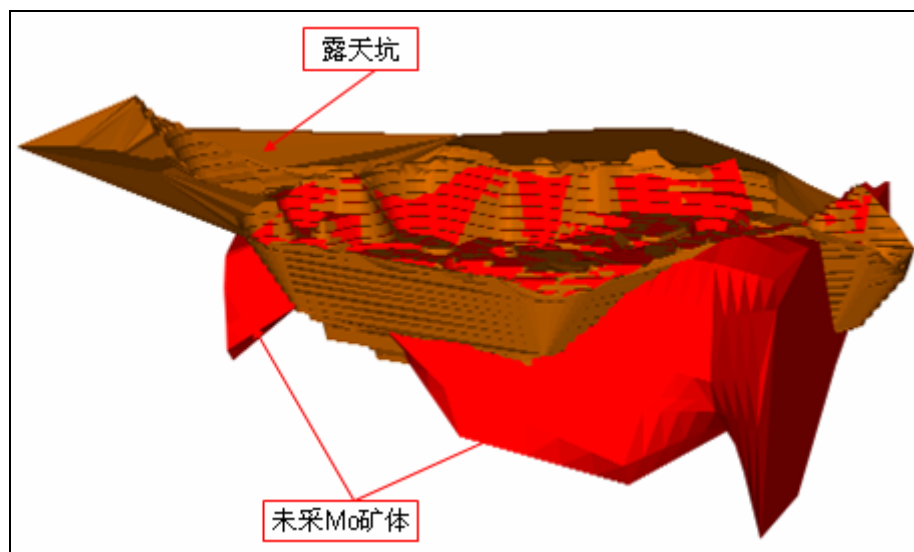


图 3-16 露天坑和矿体已经开采到的最终境界图

3.7 矿体矿量计算

矿山矿量计算原理是以建立矿体的块体模型为基础，建立块体模型时块体的尺寸为 $50 \times 50 \times 25$ ，由于钻孔资料提供的是单个钻孔的化验数据，在钻孔周边矿体是没有数据的，所以在没有化验数据的矿体部分，Surpac 软件运用距离幂次反比法，将同一个块体附近数据进行组合得到单个块体的矿体。然后把所有块体的矿量和品位进行计算，就得到矿山的总矿量和矿体的平均品位。

矿量的多少影响矿山的规划和发展，Surpac 软件中有强大的矿体计算功能，矿量的计算首先使建立的块体模型处于连接状态，再在工具栏中找到块体模型菜单下的报告菜单，如图 3-17 所示。



图 3-17 矿体品位计算菜单

然后按上一节设计好的 Mo 矿体品位把矿体分为 4 个等级，由于按照三道庄

一期改造工程，露天坑开采的高程在+1594m 到+1282m 共计 28 个台阶。所以在整个矿山钼矿体的质量加权计算需计算每个品位段的 Mo 矿体体积、质量以及该段钼矿体的平均品位和该段矿体的总体积和质量等，具体设置如图 3-18 所示。

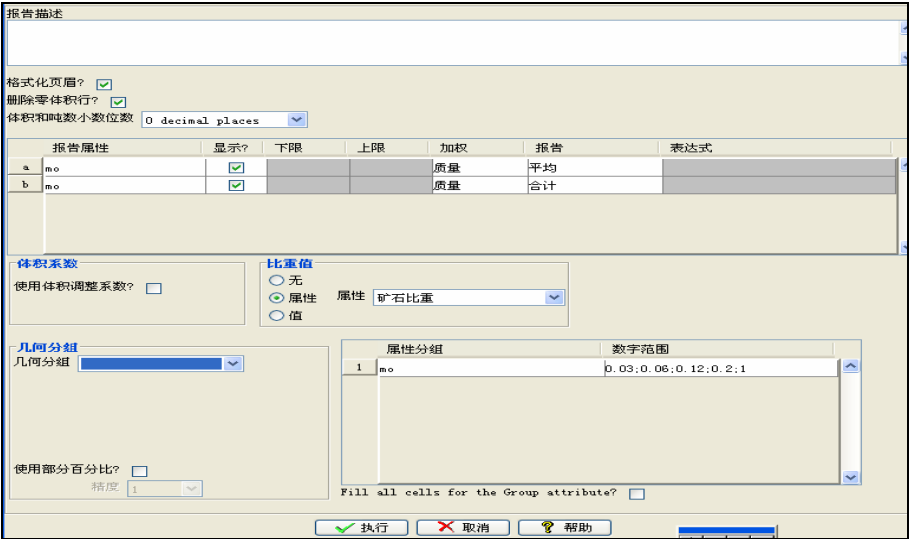


图 3-18 设置参数图

在 Surpac 中进行矿体的圈定时，存在一定的误差，根据 Surpac 提供的折减系数^[31]，在此折减系数取 0.9，Surpac 软件自动计算得到结果如图 3-19 所示。

Surpac Minex Group					
块体模型报告					
使用约束					
a. INSIDE CONSTRAINT 内部3					
保留局部在约束内的块: False					
Mo		体积	吨位 (t)	Mo (%)	Mo (t)
0.03 -> 0.06		226617188	725175011	0.04	313690.13
0.06 -> 0.12		133171875	426150006	0.08	353068.26
0.12 -> 0.2		40117188	128375002	0.15	193363.12
0.2 -> 1.0		12218750	39100001	0.28	108561.03
总计		412125000	1318800020	0.07	968682.54

图 3-19 矿山总矿体品位计算结果

矿体在未开采之前，经岩石力学实验得到矿体的密度为 3.2t/m³^[76]，矿山也不存在空区，经过上述处理后的矿山在未开采之前结果如表 3-4 所示：计算得到 Mo 矿体总质量为 830844t，其中品位分布在 0.03%~0.06%之间的矿体有 261063t，品位分布在 0.06%~0.12%之间的矿体有 306828t，品位分布在 0.12%~0.2%之间的矿体有 173306.3t，品位分布在 0.2%~1%之间的矿体有 98532t。

表 3-4 经计算后得到的矿山总矿体的品位分布表

Mo 矿体品位 区域	矿岩总体积 (m³)	矿岩质量 (t)	Mo 矿体在该段 的平准品位 (%)	Mo 矿体总质 量 (t)
0.03-0.06	2023955469	652657501.4	0.04	261063
0.06-0.12	119854688	383535000	0.08	306828
0.12-0.2	36105469	115537501.4	0.15	173306.3
0.2-1.0	10996875	35190000	0.28	98532
总计	370912500	1186920000	0.07	830844

上面算出的是该矿山在未开采之前的总矿量，但是到目前为止矿山开采到 1438 水平，所以计算矿山剩余的矿体和剩余矿体的平均品位是很重要的，计算的过程和上述计算方法一样，只是在设置窗口内加一些约束就可以实现剩余矿体矿量的计算了。在计算得到的结果中包括空区的体积和原先地下开采的各种巷道、硐室等体积，所以需要把软件计算的总体积减去空区的体积，在查阅资料^[76]后，得知矿山的空区主要分布在 1280~1364 水平之间，且空区的面积为 $1.02\times 10^8\text{ m}^3$ ，所以在计算中矿体的体积和未开采的矿体体积时要减去空区的体积，才得到真实矿体的体积。由于在现阶段的空区探测过程中并没有把所有的空区体积探测出来，所以只能将空区的体积平均分配到每一个水平，Surpac 软件自动计算的结果如下图 3-20 所示。经过处理的计算结果如表 3-5 所示。

Surpac Minex Group		块体模型报告				Mar
使用约束						
a. INSIDE CONSTRAINT 矿体内部						
保留局部在约束内的块：False						
Mo	Z	体积	吨位(t)	Mo(%)	Mo (t)	
0.03->0.06	1228.0->1438.0	47882500	153224000	0.045	68468.84	
小计		47882500	153224000	0.045	68468.84	
0.06->0.12	1228.0-> 438.0	69142500	221256000	0.086	189815.30	
小计		69142500	221256000	0.086	189815.30	
0.12->0.2	1228.0->1438.0	32677500	104568000	0.151	157784.68	
小计		32677500	104568000	0.151	157784.68	
0.2->1.0	1228.0-> 438.0	10577500	33848000	0.265	89581.25	
小计		10577500	33848000	0.265	89581.25	
总计		160280000	512896000	0.099	505650.09	

图 3-20 矿山剩余矿体品位计算结果

表 3-5 经计算后得到的矿山剩余矿体的品位分布表

1228 水平 -1438 水平	Mo 矿体品 位区域 (%)	矿岩总体 积 (m³)	矿岩质量 (t)	Mo 矿体在该段的 平准品位 (%)	Mo 矿体总 质量 (t)
	0.03-0.06	41059850	131391520	0.045	59126.18
	0.06-0.12	60193850	192620320	0.086	165653.5
	0.12-0.2	27375350	87601120	0.151	132277.7
	0.2-1.0	8502050	27206560	0.265	72097.38
总计		137131100	438819520	0.099	434431.3

到目前为止, 矿山的开采水平到 1438 水平, 所以为了便与矿山的管理人员了解矿体品位的分布, 在 1438 水平到 1228 水平之间, 每按两个台阶高度, 即为 20 m, 计算矿体的品位、矿体质量、矿体体积等, 把品位分为四个等级, 计算结果如表 3-6 所示。计算得到还未开采的矿体品位分布在 0.03%~0.06%之间的矿体有 51877t, 品位分布在 0.06%~0.12%之间的矿体有 152140t, 品位分布在 0.12%~0.2%之间的矿体有 135987t, 品位分布在 0.2%~1%之间的矿体有 6041t。

表 3-6 经计算后得到 1282 水平到 1438 水平的矿体的品位与金属量分布表

Mo 品位区域	Z 值范围	体积 (m ³)	矿岩质量 (t)	Mo 品位 (%)	Mo 金属量
0.03 → 0.06	1282.0 → 1302.0	4355000	13936000	0.047	6528.19
	1302.0 → 1322.0	7550000	24160000	0.044	10561.15
	1322.0 → 1342.0	6360000	20352000	0.045	9072.20
	1342.0 → 1362.0	5490000	17568000	0.045	7831.36
	1362.0 → 1382.0	4875000	15600000	0.045	6945.79
	1382.0 → 1402.0	4385000	14032000	0.045	6322.51
	1402.0 → 1422.0	2900000	9280000	0.05	4616.03
小计		35915000	114928000	0.045	51877.22
0.06 → 0.12	1282.0 → 1302.0	6750000	21600000	0.086	18606.31
	1302.0 → 1322.0	8100000	25920000	0.086	22386.70
	1322.0 → 1342.0	8865000	28368000	0.084	23782.21
	1342.0 → 1362.0	8280000	26496000	0.083	22120.14
	1362.0 → 1382.0	8237500	26360000	0.086	22638.62
	1382.0 → 1402.0	8775000	28080000	0.089	25116.67
	1402.0 → 1422.0	6300000	20160000	0.087	17488.86
小计		55307500	176984000	0.086	152139.51
0.12 → 0.2	1282.0 → 1302.0	3870000	12384000	0.15	18563.48
	1302.0 → 1322.0	2700000	8640000	0.155	13409.25
	1322.0 → 1342.0	4357500	13944000	0.153	21285.40
	1342.0 → 1362.0	5310000	16992000	0.151	25711.48
	1362.0 → 1382.0	4997500	15992000	0.149	23898.33
	1382.0 → 1402.0	3580000	11456000	0.146	16733.34
	1402.0 → 1422.0	3400000	10880000	0.151	16385.47
小计		28215000	90288000	0.151	135986.75
0.2 → 1.0	1282.0 → 1302.0	860000	2752000	0.305	8391.99
	1302.0 → 1322.0	1400000	4480000	0.274	12261.77
	1322.0 → 1342.0	1697500	5432000	0.247	13411.81
	1342.0 → 1362.0	1600000	5120000	0.243	12428.84
	1362.0 → 1382.0	1220000	3904000	0.24	9367.79
	1382.0 → 1402.0	710000	2272000	0.231	5240.26
	1402.0 → 1422.0	800000	2560000	0.236	6041.32
小计		8287500	26520000	0.253	67143.78
总计		127725000	408720000	0.99	407147.26

1438 水平到 1282 水平钼矿体品位在高程的分部情况，分布情况如图 3-21 至图 3-24 所示：

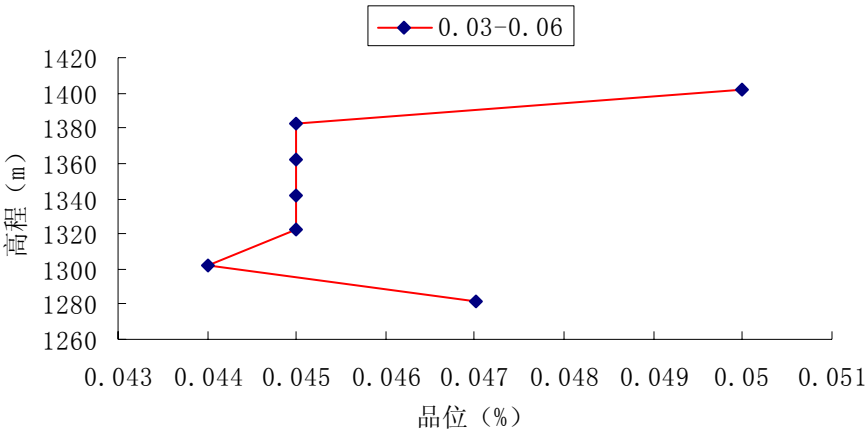


图 3-21 Mo 矿体品位在 0.03~0.06 随高程变化折线图

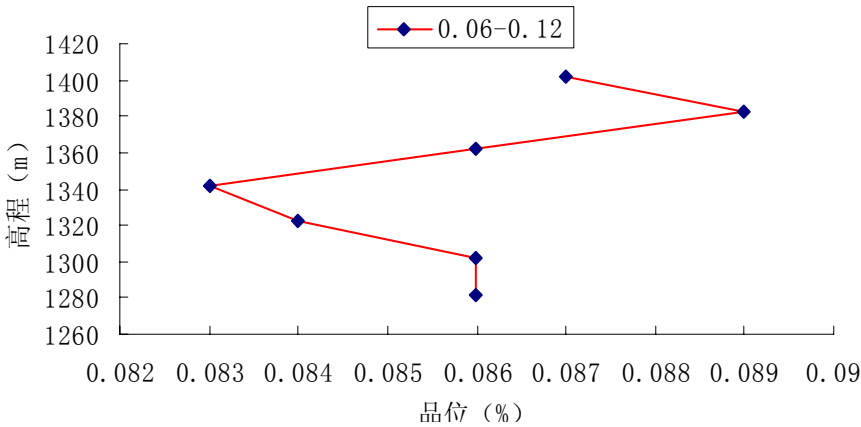


图 3-22 Mo 矿体品位在 0.063~0.12 随高程变化折线图

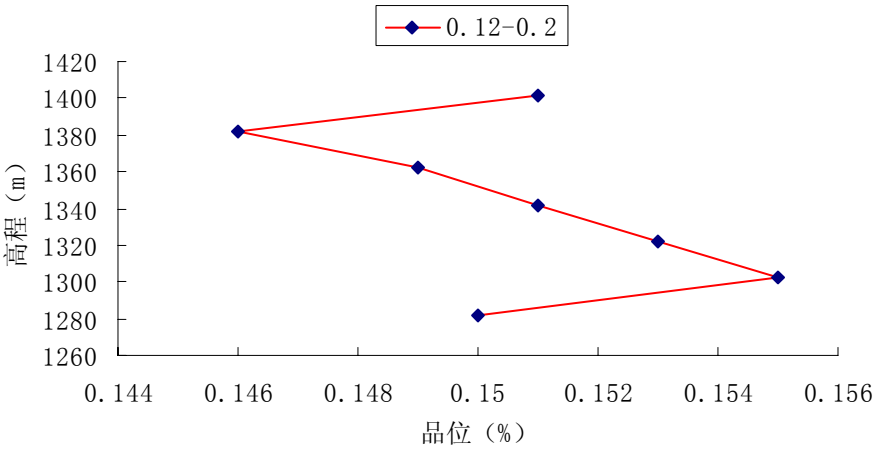


图 3-23 Mo 矿体品位在 0.12~0.2 随高程变化折线图

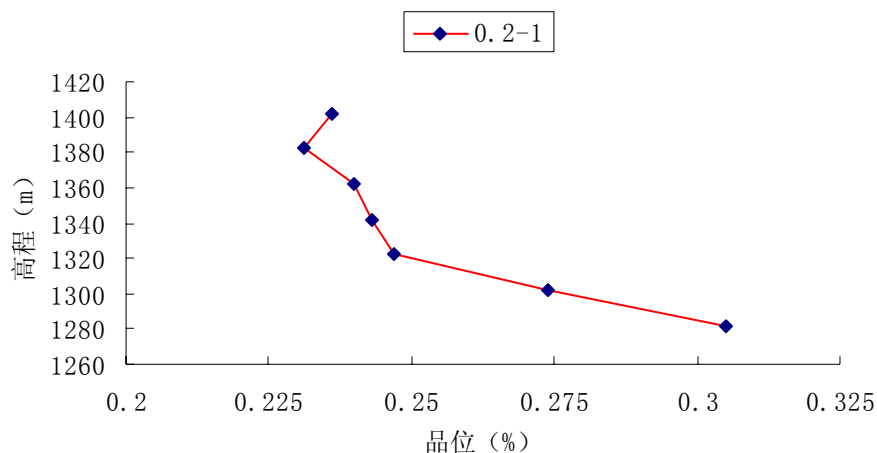


图 3-24 Mo 矿体品位在 0.2~1.0 随高程变化折线图

3.8 本章小结

三维建模技术是一种新的矿床地质学研究方法。本文以栾川钼矿详细勘探地质资料剖面图和几百个钻孔的数据资料为基础,通过运用澳大利亚 Surpac Minex Croup 开发的 Surpac Vision5.1-F 版软件首次建立了包括钻孔定位、钻孔测量和样品分析数据等信息的钻孔数据库,展示了钻孔的孔口空间位置、钻孔的三维空间变化信息、空间延伸方向、倾角,同时还可以显示钻孔不同深度样品的各种数据信息,实现了钻孔的三维可视化。建立了可以从任意角度观察、旋转、缩放、任意位置切割矿体剖面的栾川钼矿矿床矿体三维立体模型。

(1) 在分析 Surpac 建立实体模型的机理基础上,根据地形特点和、地形信息的详细程度、数据类型和数据量等,总结出三种常用建立地表模型的方法:简单趋势面法、数字化仪法和综合法。

(2) 通过 Surpac 提供的“DXF 文件至线/DTM 文件”接口,将常规 CAD (如 AutoCAD) 下所建立的矿山地形图文件 (.dxf) 导入 Surpac 系统,建立了栾川三道庄地形模型。

(3) 原始基础数据是矿床地质模型的基础,因此一定要保证其准确性和适合的数据结构。

(4) 在模型建立和使用过程中,人工交互干预非常重要,对地质的正确解释就是通过人工交互干预融合到模型中的。同时选择适合的阐述、连接方法、辅助轮廓线、辅助线、标志线等都需要人工选择。所以在建模的过程中,逐渐形成一些标准的规律、规则和流程非常重要。

(5) 在建立模型过程中应结合现场应用深入完善系统功能,提高建模的自动化程度和效率,尤其要加强样品点相同处理、过密点的删除处理、随着露天坑的深入,所以在露天坑的建模过程中,要逐步更新三维模型。

(6) 对矿体的品位进行了估值,在三维模型中就可以反映出矿体各个地方

的品位情况，便于矿山有选择性的开采矿石，降低矿石的损失率和贫化率。

（7）计算了矿山的总矿量和剩余矿体矿量，并且对未开采的矿量进行了品位分布分析。得到的计算结果和文^[76]基本一致。

第四章 采空区探测与三维模型的建立

岩体是一种不均质且含有节理、裂隙的材料,由于岩石顶板的暴露面积过大,以及岩体的不均质性,再加上岩体内部存在各种软弱面,如层理、裂隙等,特别是大的断层、破碎带、软弱夹层等,大大削弱了岩体的完整性。根据 Griffith 强度理论,岩体的变形不断发展,岩体内的裂隙不断扩展,互相贯通,直至断裂带相连部分的承载能力小于下部岩石的重量,岩石就发生塌落,起初都是沿结构面破裂,但随着冒落的进行,新的自由面的形成会引发新的冒落^[79]。随着时间的推移,岩内的裂隙逐渐地增多、发展,岩石的强度也逐渐地弱化,岩石的弹性模量值也逐渐地下降,岩石的性质在发生缓慢地变化。另外岩石的蠕变、风化等的作用也促进了岩石的弱化。根据剪切强度理论,两个最大剪应力达到临界值时,岩体就发生屈服或破坏。由于岩体变形的不断发展,节理裂隙的相互贯通,顶板的岩石在不停地冒落^[80-82]。当冒落到一定的程度,岩体内的剪应力达到了极限值,岩石即开始破坏,并迅速形成断裂面,岩石发生突然冒落,直至地表,最后形成空区、塌陷区或地表沉降。出现上述的情况给矿山的生产和居民生活带来严重的影响。所以,查明和发现采空区的位置、大小和形状是矿山管理人员必须解决的问题,也是确保矿山安全生产和居民安全生活的重要前提。

4.1 采空区的形成

栾川钼矿三道庄露天矿因历史原因,经历了 30 余年不合理的地下开采,在矿山现有露天开采境界内,既存在大规模分段凿岩阶段落矿空场留下的大空区,也存在为数众多且大小不详的民采空区。这些采空区形态复杂,在空间位置上层层叠叠,高低不同,使整个露天境界内矿体千疮百孔。随着三道庄露天坑底临近采空区群,其露天坑底与采空区的隔离层厚度越来越薄,露天矿作业人员与大型设备受到采空区的直接威胁,随时有可能因地表坍塌而发生重大安全事故。因此,矿山面临的重要任务就是对露天坑底内的采空区进行探测,查清采空区位置、形状、大小、规模,以便确定露天坑底的安全隔离层厚度和选择行之有效的处理方法。

栾川钼矿的开采始于上世纪 60 年代末期,由地下开采形成的采空区约 1017.2 万 m^3 ,由于年代久远,受岩石风化与破坏作用的影响,采空区界限大多发生了变化,原有的采矿通道大多已不能直接进入进行勘测,而掘进新巷道与清理废旧巷道的成本高,施工不安全。因此,必需寻求新的方法在地表探测空区。鉴于目前国内外对钼矿采空区的探测尚无成熟的技术与经验可供参考,而各种地

球物理技术探测方法的使用条件与使用环境不同,对测量的空区大小、位置和形状和空区实际的情况相差很大,考虑了诸多因素,中南大学资源安全工程学院从英国引进的 MDL (Measurement Devices Ltd) 公司研制的空区探测系统(C-ALS)主要是针对危险或人员无法进入的地下空间。该系统不仅对地下空区进行自动的、全方位的扫描,还能够对测量的空区自动生成三维立体模型。

4.2 采空区的探测与可视化

采空区的可视化是矿山工作人员了解空区的形状、大小、空间位置的最好方法,最近国内对采空区的可视化的探测还处于初始阶段,以前最常见的空区探测方法有:地质雷达法、瞬变电磁法、浅震反射波法、瞬态瑞雷波法、高容度电阻率法声发射探测、地应力测量和 GIS 等手段,以上方法只能对相对安全的地下空间测量起到一定的作用,但对人员无法进入的地下空间和地下特别危险空区就起不到较好的测量效果。而当今的许多矿山,许多地下空区是人员无法进入进行现场测量的,这就必须采用一种相对先进的且工作人员不需要到达空区现场进行测量的设备。针对这一情况,我们引进了英国引进的 MDL (Measurement Devices Ltd) 公司研制的空区探测系统(C-ALS)。

4.2.1 C-ALS 探测系统的介绍

空区探测系统(C-ALS)^[83]由英国 MDL 公司研制的,该系统的主要组成系统有探头、钻孔摄像头、标准加长件、两节加长件、地面装置、电缆、Boretrak® 探杆、三角架,绞车和电线导线、搬运箱、校准夹具、数据接收器、手提式计算机、应用控制软件和处理软件等。一些主要的装置如图 4-1 所示。

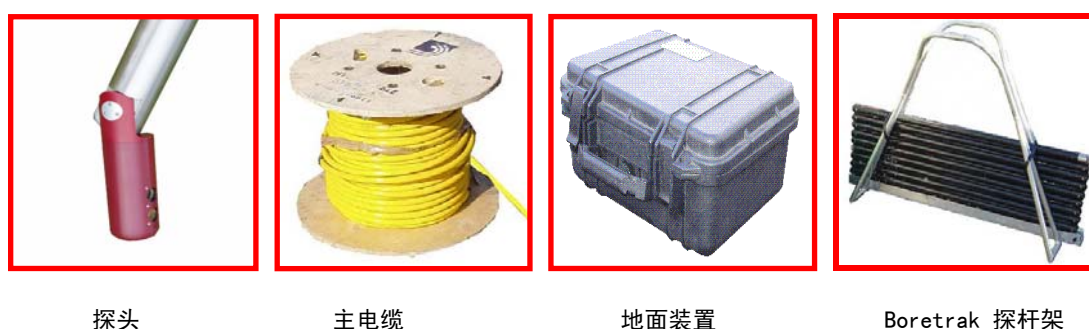


图 4-1 C-ALS 的部分仪 C-ALS 探测系统的介绍器装置

C-ALS 探测系统具备以下的功能:电动双轴扫描头可确保全方位 360° 扫描覆盖高达 150m 范围内的整个空隙;数据捕捉率可达每秒 200 点,精确度为 $\pm 5\text{cm}$;带有扫描头的 C-ALS 设备装有一个数字指南针以及纵倾和横摇传感器;仪器利用“飞行时间”激光测量技术来测量从岩石地面到其他地面等,无需在目标上放置反射器,这样在某些不可接触区域能够进行精确测量,如对放矿溜道和空区处

进行精确测量；C-ALS 带有红外线钻孔摄像机，它有助于扫描头的安放，激光对眼无伤害，不锈钢结构有助于保护仪器的运输等。

C-ALS 探测过程：探测前需要确定空区的大概位置，然后在地面或者地下比较安全的地方钻孔，钻孔的大小为 25cm 左右。C-ALS 仪器组装比较简单，把前面的激光探头、连接杆和数据传输线连接好，再把电源接至主电缆的末端，启动手提式计算机，整个仪器的连接就完成了。在探测较浅的空区时，工作人员手提主电缆和 Boretrak 杆把 C-ALS 探头放入钻孔就可以探测了，如图 4-2 所示；但在测量较深的钻孔时，C-ALS 探头可用在固定在地表三角架上的电线电缆放入地下进行测量，如图 4-3。

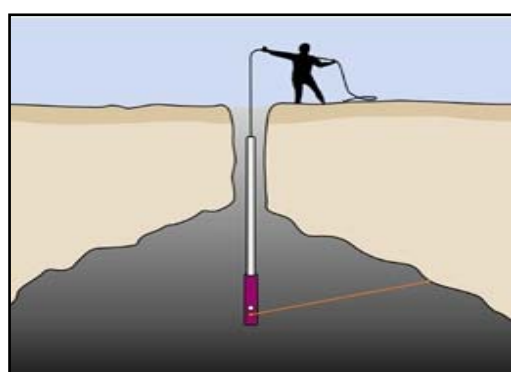


图4-2 C-ALS在测量浅部空区示意图



图4-3 C-ALS在测量深部空区示意图

C-ALS 探测仪在对地下空区进行探测时，探头的扫描类型可分为：单水平切面、水平扫描或垂直扫描。在连续扫描行之间所需的增量(单位：度)可在增量数值中输入。为了最大限度获得详情，此值可设定为低至 0.1° 。如要获得不太详细的扫描信息，可输入更高的设定值，扫描行密度设定即可降低。通过输入增量数值，系统将计算并显示扫描的估计时间。单水平切面：是扫描器从 0° 到 360° 的单一水平旋转。扫描头不作垂直移动且收集不到数据，一般这是不采用的。水平扫描：这是仪器默认设置，扫描头将在 0° 垂直角处开始 (沿着探头，笔直向后上方看)，然后以完整的 360° 圆圈水平旋转，每完成一行水平扫描以后，扫描头将按照用户定义的“增量数值”垂直移动，继续进行直至垂直轴摆动到完全的 180° 为止，到了最后的水平扫描时，扫描头应垂直指向下方，远离探头，如图 4-4 所示。垂直扫描：垂直扫描对于某些操作而言可能更为可取，特别是在扫描过程中需要记录显著水平特征的情况。垂直于这些特征的扫描行将确保能收集更多细节，扫描头将从 0° 垂直旋转 (沿着探头笔直向后上方看) 到 90° (笔直向下看，远离探头)，在完成每个垂直扫描行以后，扫描头将按照用户定义的“增量数值”水平移动，继续进行直至水平轴发生 360° 旋转为止，如果有不感兴趣的空隙部分，可输入扫描开始和结束的限制角度，如图 4-5 所示。

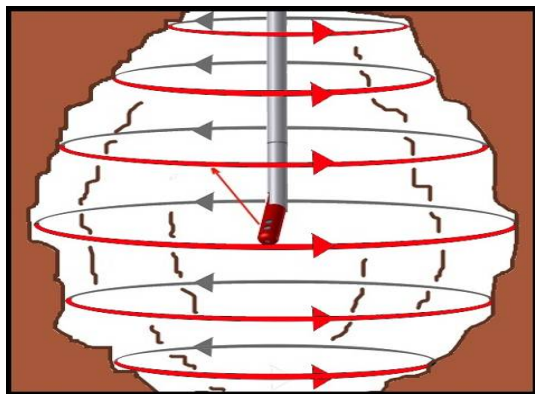


图4-4 C-ALS探头在空区水平扫描示意图

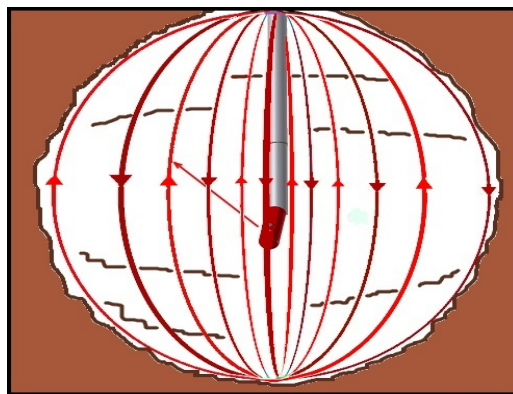


图4-5 C-ALS探头在空区垂直扫描示意图

4.3 C-ALS 探测系统在栾川三道庄矿的应用

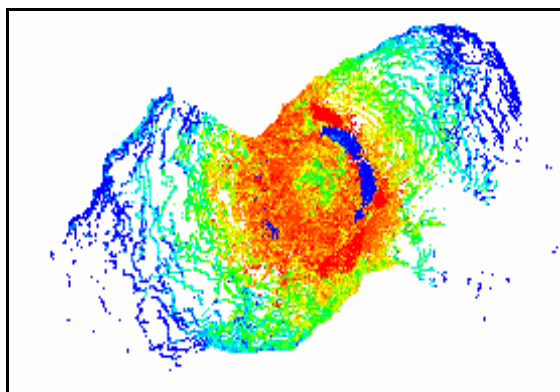
中南大学资源与安全工程学院于 2007 年 6 月 20 日至 7 月 30 日，对矿山工作人员进行的技术培训和现场测量，如图 4-6，与此同时对栾川三道庄露天矿的 10 多个地下空区进行了测量。



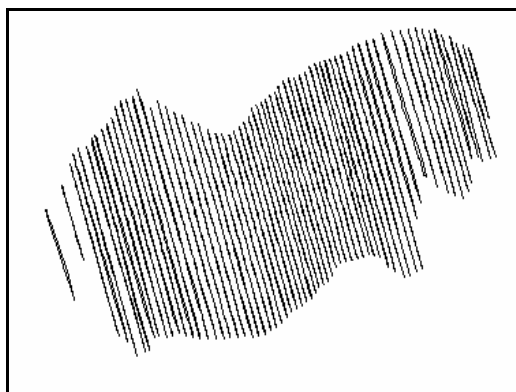
图 4-6 工作人员在现场探测

4.3.1 1438-2 空区水平实测情况

1438-2 测量的原始数据和经过处理的后的图形如图 4-7 所示。



1438-2 水平空区的原始数据点云图



1438-2 水平空区处理后的线串图

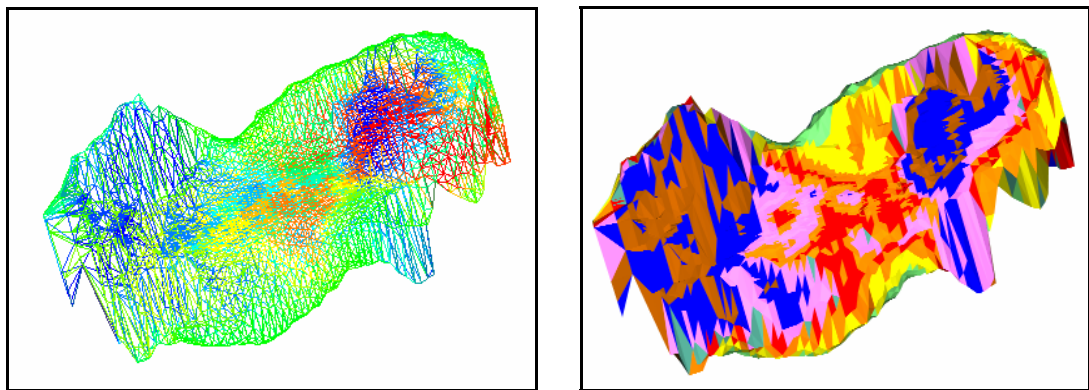


图 4-7 1438-2 空区处理过程图

在 1438-2 水平空区的三维图形中如图 4-7 所示, X 最小坐标: 4813.092 , X 最大坐标: 4866.682; Y 最小坐标: 6063.280 , Y 最大坐标: 6100.178; Z 最小坐标: 1422.879, Z 最大坐标: 1432.057, 表面积: 2967 m², 体积: 2621.5m³ 空区的最大长度为 52.707m, 最大宽度为 28.814m, 最大高度为 5.519m。该空区体积较大, 要采取一定的处理措施, 进行力学分析得到结果, 建议留 32m 的安全厚度或爆破充填。

4.3.2 1330 水平空区的实测情况

1330 水平空区测量的基本情况如表 4-1 所示。

表 4-1 1330 水平空区基本情况

空区描述	该空区属于常规开采留下的采高为 4 米的小型采空区，各处顶底板高度基本一致。
钻孔口坐标 (X,Y,Z)	6459.1,4948.6,1331.0
钻孔深度	15.2 m
空区采高	4.136 m
空区体积	647 m ³

1330 水平空区在编辑软件中的实体模型见图 4-8。

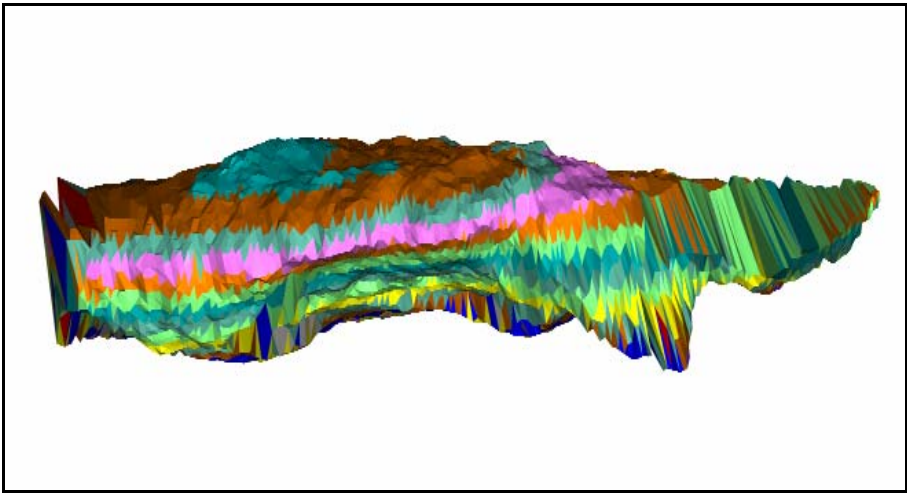


图 4-8 1330 水平空区实体模型

置于 CAD 各阶段平面图中的空区水平投影图见图 4-9 所示。

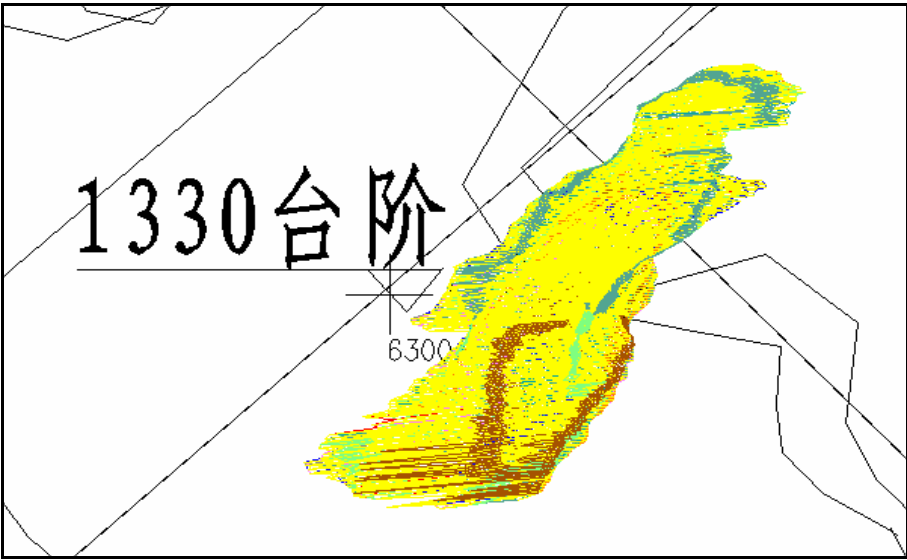


图 4-9 1330 水平空区水平投影图

4.3.3 1414 水平空区实测情况

1414 水平空区测量的基本情况如表 4-2。

表 4-2 1414 水平空区基本情况

空区描述	该空区属于常规开采留下的采高为 2.4 米的小型采空区，各处顶底板高度基本一致。
钻孔口坐标 (X,Y,Z)	6333.300, 4748.300, 1415.399
钻孔深度	14 m
空区采高	2.4 m
空区体积	174 m ³

空区在编辑软件中的实体模型见图 4-10 所示。

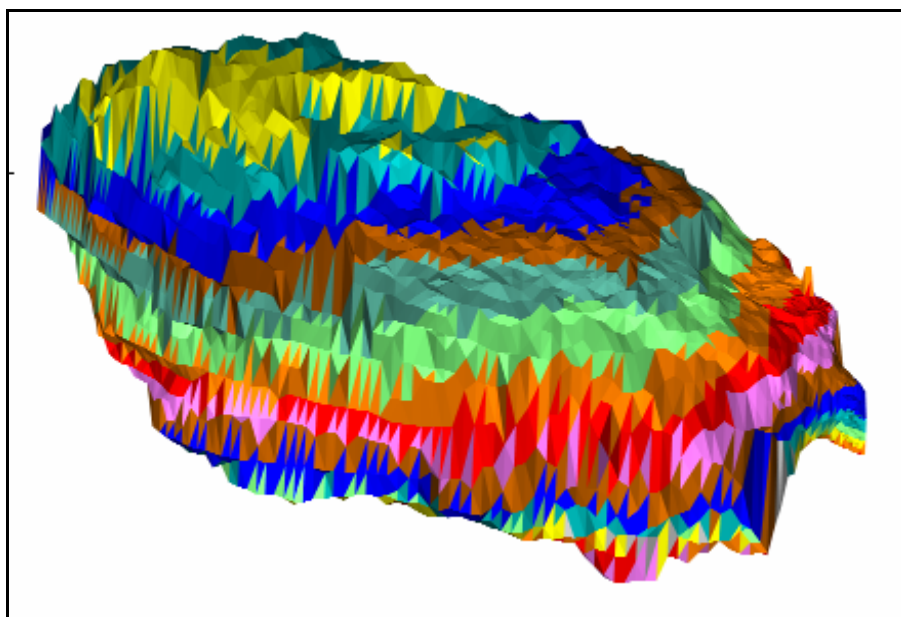


图 4-10 1414 水平空区实体模型

置于 CAD 各阶段平面图中的空区水平投影图见图 4-11 所示。

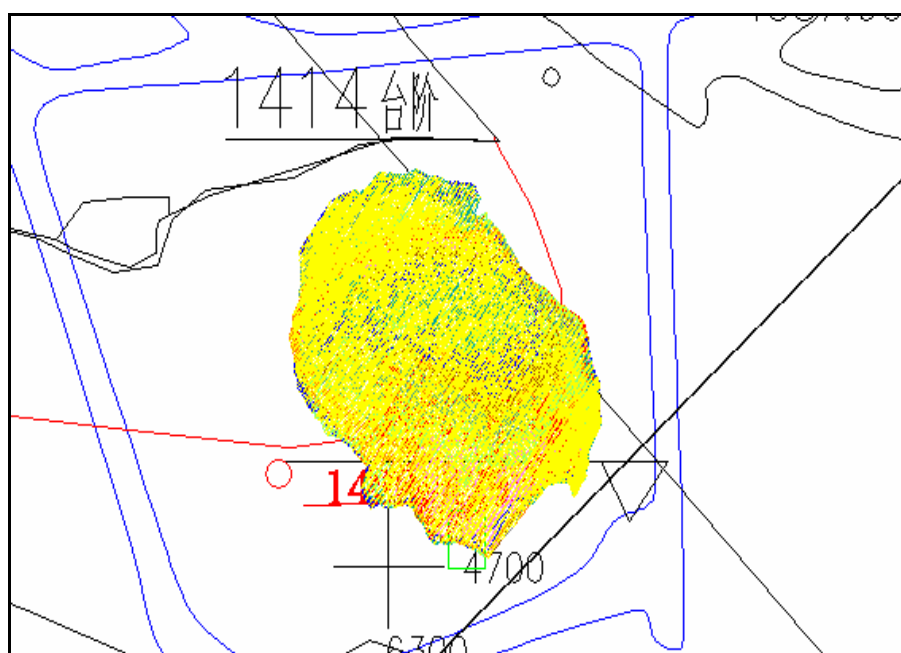


图 4-11 1414 水平空区水平投影图

4.3.4 1438-1 水平大型空区实测情况

1438-1 水平所测空区基本情况如表 4-3 所示。

表 4-3 1438-1 大型空区基本情况

空区基本情况描述	该空区为地下开采留下的大型、多层复合采空区，由于台阶爆破导致空区塌陷，处于安全原因至今未对其进行补充探测，如果补充探测孔后可做更详尽的探测。水平投影图 7 中的黄色线条圈定的区域可能为该大型空区与下部空区的连通部分，此连通部分的标高在 1384 左右，在日后探测和处理中应多加注意。	
	钻孔口坐标 (X,Y,Z)	6080.6,4781.4,1439.1
	钻孔深度	29.4 m
	空区体积	157078 m ³

空区在编辑软件中的实体模型见图 4-12 所示。

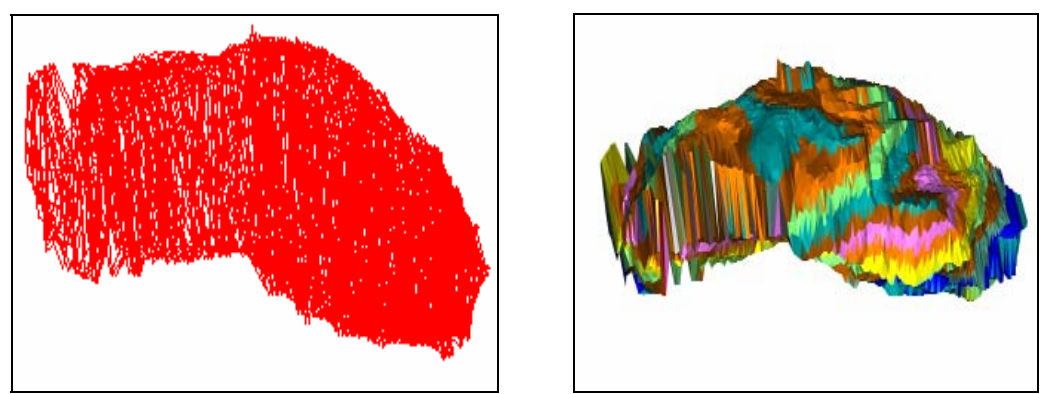


图 4-12 1438-1 水平大型空区实体模型

置于 CAD 各阶段平面图中的空区水平投影图见图 4-13 所示。

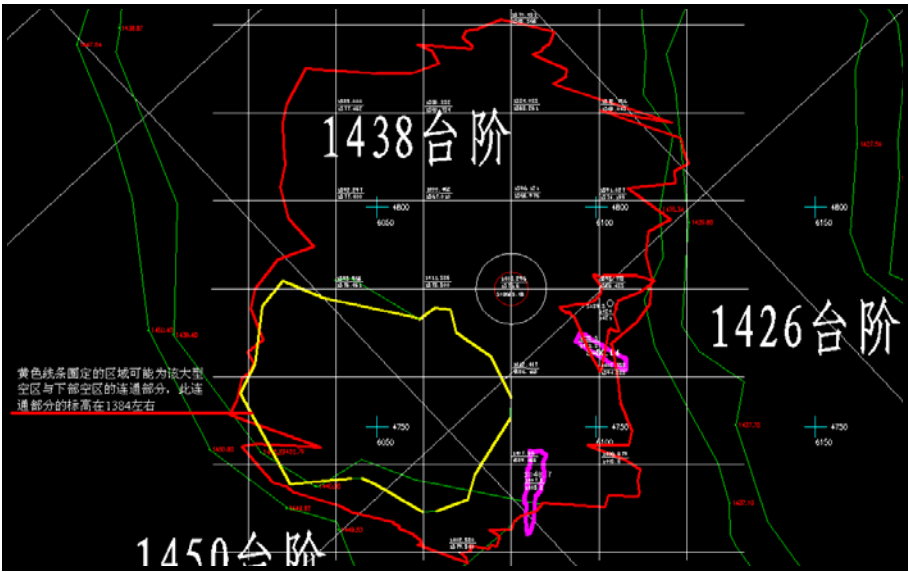


图 4-13 1438-1 水平大型空区水平投影图

由于矿山的采空区有数千个,我们基本上只能对矿山现所处的开采水平进行探测,从以上所列出几个大型空区来看,这些空区对矿山的施工和计划产生了严重影响,特别是 1438-1 水平空区,这个空区体积为 157078m^3 ,这种大型采空区是国内外露天采矿中很少遇到的,如果矿山管理者对这种大型空区不进行及时处理,那么可能对矿山带来不可估计的损失。所以采用 C-ALS 对矿山空区进行一个全方位的了解,是现在大型矿山发展的一个趋势,也是国家对矿山实行安全管理的要求。

4.4 采空区在整个矿山模型中的耦合

采空区在矿山位置中的具体化对矿山工作人员来说是至关重要的,只有现场工作人员了解采空区的具体位置后,才能确保矿山安全生产。由于前面利用 Surpac 软件建立好了矿山三维模型,所以,把空区三维模型导入矿山三维模型中,使我们在整体上对空区的空间位置有所了解,这样才能便于矿山采矿设计和施工。

将采空区导入 Surpac 软件建立的矿山三维模型中,首先,要求测量的空区要保存为 str(线文件)形式,这样才能确保软件对接;其次,要在测量空区时,一定要确定井口位置的三维坐标,由于空区探测系统测量出的线文件是一组线文件,且所有线文件是同一个编号,这样就不能在 Surpac 软件中进行处理,所以在调整空区位置时,必须在 C-ALS 软件中进行坐标调整,把空区的三维位置调整为矿山实际坐标(如图 4-14),这样导入 Surpac 软件中的空区才是矿山的实际坐标。同时,在 Surpac 软件中对探测空区的线文件无法进行空间位置矢量化,这样就迫使我们在进行探测时,必须运行 GPS 对空区的位置进行定位。然后对空区三维位置进行转换,得到空区在矿山中的实际坐标。这样才能确保导入的空区能够耦合到矿山整体模型中,如图 4-15 所示。



图 4-14 探测空区在矿山实际的位置图

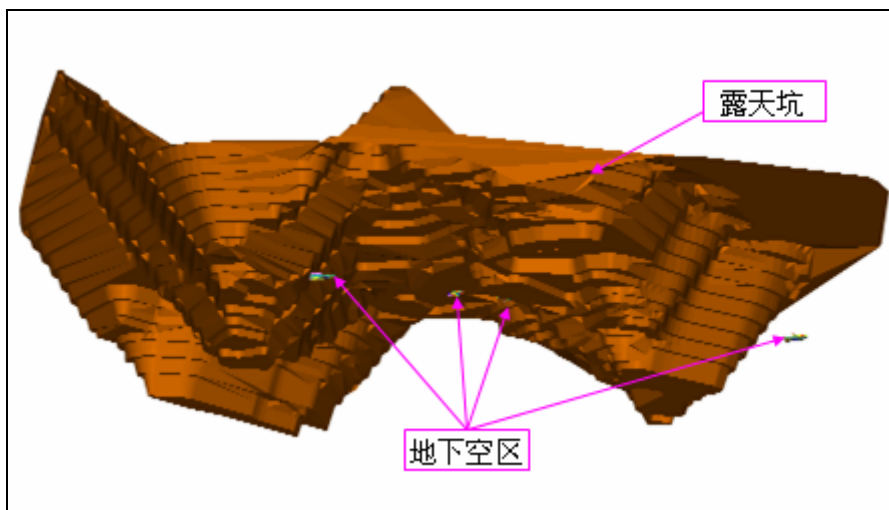


图 4-15 空区在整个矿山模型中的位置图

由于空区的体积比露天坑的体积小得多,所以探测的空区在三维模型中的显示只是很小一部分,无法将整个矿山模型全部显示出来。这就可能导致视觉效果不佳,特别是一些在矿体以下,现在还未知的空区,将探测的空区导入三维模型中时,空区的显示在矿体中或者在露天坑另外一侧,所以在整个矿区的模型单一个视角内就无法看到这些空区的位置和大小,这样就只能通过 Surpac 软件旋转和剖面来查看空区的位置和大小,其中切面查看就比较复杂。但是能够通过 Surpac 软件将空区的最大截面通过投影到 XY 平面上,再把空区投影在 XY 平面上,同时能耦合到整个矿山平面图上,便于矿山工作人员在平面图上了解空区位置和大小而进行安全施工。

4.5 本章小结

本章主要围绕地下空区的探测和成图进行研究。在研究的过程中也存在着一一些问题,特别是运用 C-ALS 进行地下空区探测时,为了使空区的测量结果和空区的实际形状一致,在设置仪器参数时一定要细致;同时在测量的过程中尽可能保护仪器的安全。

(1) 在进行空区探测前,一定要检查 C-ALS 仪器内的各个参数的设置,把仪器的各个部分连接好,使探头回到初始的位置。并且要检查探头进入的钻孔是否与空区相通。

(2) 空区探测后,进行图形的处理时,一定要校正空区的三维坐标,这样才能确保空区的位置与现场一致。由于在矫正坐标位置时,Z 坐标的位置与实际的位置有一定的差别,所以要适当的对 Z 值进行调整,从而确保空区位置的准确性。

(3) 由于我们采用 360° 的全方位的激光扫描,扫描后经过处理的图形基

本上与实际的空区形状一致。这样就可以确保我们了解空区的大小、位置、形状等一系列的情况。

(4) 探测的空区导入 Surpac 建立的矿山模型中, 能够使我们从三维角度来了解空区的情况, 能够了解空区与矿体、空区与露天台阶、空区与周边建筑物的关系, 从而确定一定安全距离, 确保矿山安全。

(5) 将空区的三维模型投影到 XY 平面上, 再与整个矿山的开采平面图相耦合, 这样空区的实际形状就能够在平面上显示出来, 这样矿山的工作人员就能够从平面图上了解空区的大小和位置, 从而确保安全施工。

第五章 采空区的数值模拟与力学分析

采空区的稳定性分析和评价是一个极其复杂的过程,数值模拟方法能够从总体上判断采空区周围岩石的应力分布规律及其变形趋势^[84]。

由于高陡岩石边坡本身复杂的地质条件,其稳定性分析是一项十分复杂的研究课题。本文主要针对河南栾川三道庄露天矿高陡岩石边坡与边坡下的采空区的稳定性问题,利用弹塑性有限元原理,运用 FLAC^{3D} 软件作为分析工具,对栾川三道庄露天矿高陡岩石边坡稳定性进行模拟分析。本文的主要工作包括以下几方面。

(1) 针对高陡岩质边坡的特点,根据实际情况建立分析模型,采用 ANSYS 软件进行建模,运用 FLAC^{3D} 软件进行数值分析。

(2) 视边坡岩体为弹塑性材料,建立了弹塑性有限元模型,对边坡开挖过程中应力场和位移场的变化规律进行了模拟分析。

(3) 选择有代表性的典型区段即选择能反映该矿山边坡岩体稳定实际情况的主要剖面建立模型,对边坡变形和岩体稳定性进行模拟分析,具有一定的代表性。

(4) 利用计算的结果分析得到地下空区和露天台阶顶板的安全隔离层厚度。

5.1 计算模型的选择

为了使计算的结果尽可能的和实际情况相接近,并且能使空区的位置反映在计算模型中,计算剖面的确是至关重要的,本文计算模型选取是以建立好的矿山模型和空区模型为基础。在模型选择中,充分考虑了空区对露天采矿的影响,由于在空区的探测过程中发现 1438-1 水平有一个特大型空区,其体积达 157078m³,所以在选取计算剖面时就充分考虑到这个大型空区,同时也具有代表性。计算剖面在 Surpac 中的位置如图 5-1 所示,切割剖面线同时切割矿体、空区、露天坑如图 5-2 所示。在切完计算面后,发现 1414 水平空区也在计算剖面中。

由于模型的范围很大,而空区的大小在露天坑中的范围较小,所以在计算时,我们取空区所在的范围进行数值计算,在数值计算软件中,计算的范围从坡顶 (Y=4766.90 X=6012.13 Z=1534.00) 到坡底 (Y=4644.39 X=6166.13 Z=1376.82),方位角为 128.3011 DMS,水平距离为 196.788m,倾斜距离为 204.926 米,垂直距离为-157.176m,坡度: -23.201°。

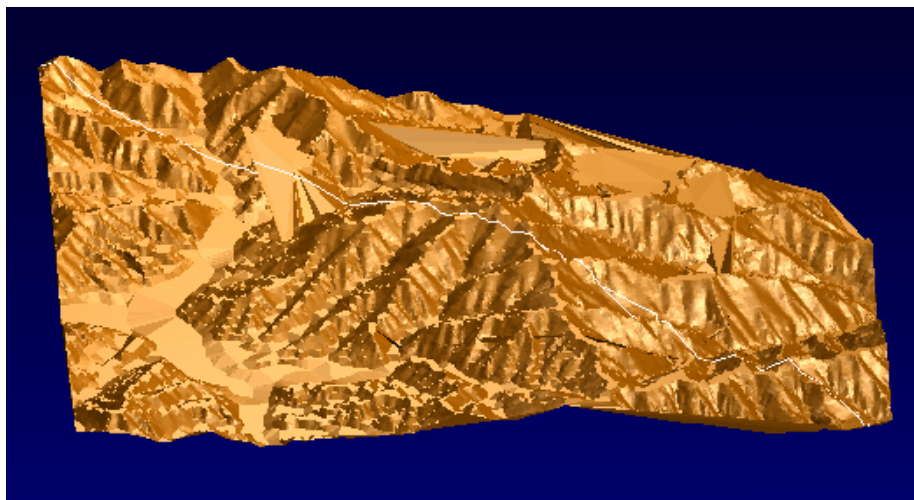


图 5-1 计算剖面线在整个模型中的位置

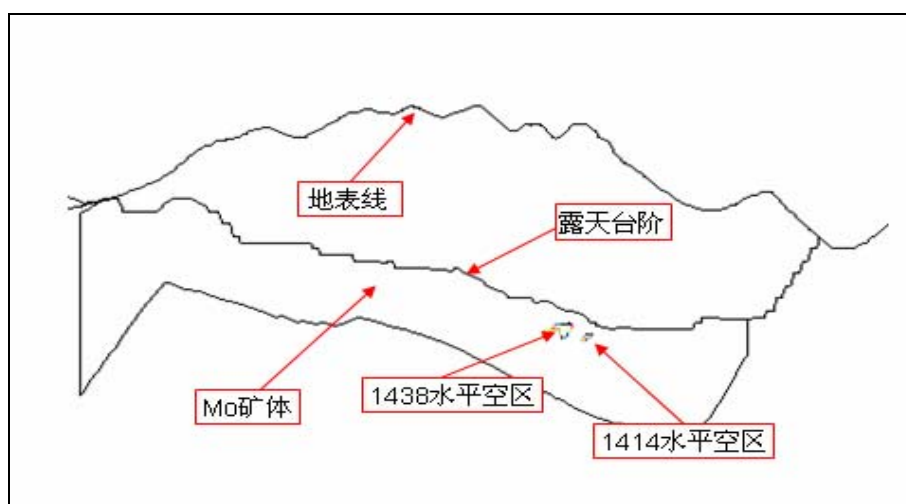


图 5-2 切割剖面切割整个模型情况

在计算过程中考虑到露天台阶剥离对空区的影响，所以计算时必须考虑露天台阶的分级剥离，在离空区较远的地方进行台阶剥离时，打孔、爆破和运输等各种因素对空区的影响较少，就不加以考虑。本文只考虑在空区上部的 5 个台阶，台阶的高度和宽度都根据建立的模型为基础，每次台阶开挖的高度也是以每个台阶的实际高度为基础，最终确定的计算剖面的范围如图 5-3 所示，其中数字代表台阶剥离的先后顺序。

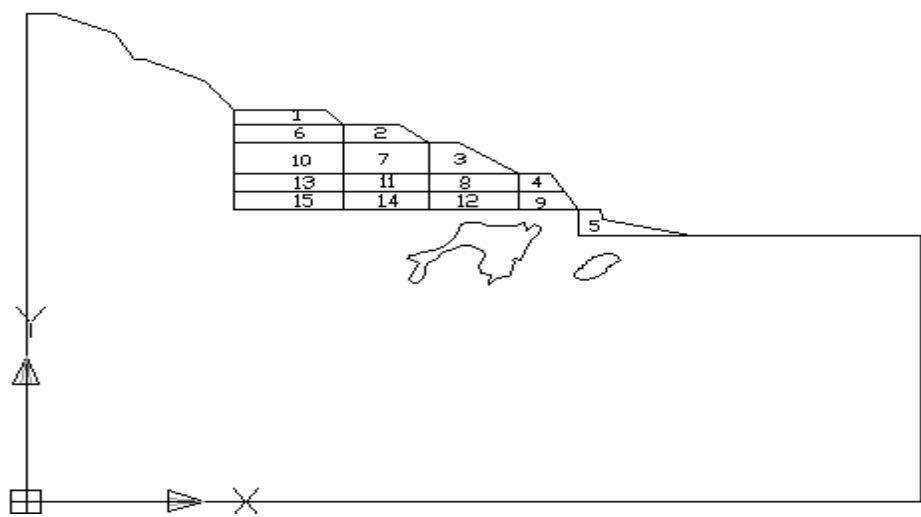


图 5-3 最终计算剖面

模型在 CAD 中建立好之后，导入 ANSYS 软件中，再导入 FLAC^{3D} 中，然后在 FLAC^{3D} 中划分网格，计算模型网格如下图 5-4 所示，分步开挖的顺序按图 5-3 中的顺序进行。

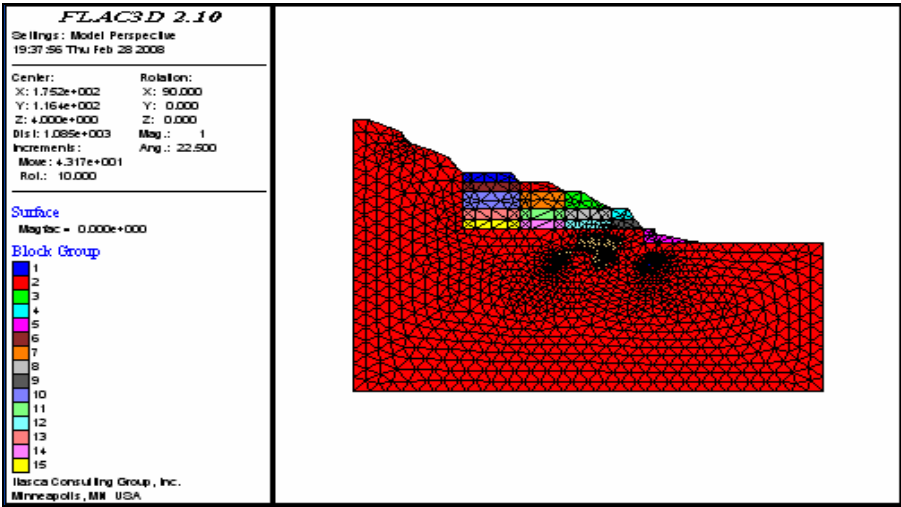


图 5-4 计算模型单元划分情况

5.2 计算模型力学参数的确定

中南大学与河南洛钼集团有限责任公司和作对其所属的三道庄露天矿开采境界内矿体及其上下盘具有代表性的矿岩进行了现场取样，取样时间为 2004 年 8 月。中南大学现代分析测试中心对岩样进行了试件加工，并于 2004 年 9 月 20 日在试验室中完成了采集岩石试样的多项物理力学试验^[76]。实验结果如表 2-2 所示。

岩石力学参数的工程处理如下：

由于实验室所测试的岩石力学参数是在理想状态下进行的，没有考虑岩体内岩石的非均质性及节理、裂隙等的存在及不同介质之间的软弱面与水等因素的影响，因而在做工程计算时，有必要对实验室所得的岩石力学试验数据进行分析并作适当的工程折减，以便确保理论分析与计算时足够的准确性。

Hoek-Brown 准则的岩体强度公式为^[76]：

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (5-1)$$

$$m = m_i \exp\left[\frac{RMR - 95}{14}\right] \quad (5-2)$$

$$S = S_i \exp\left[\frac{RMR - 100}{6}\right] \quad (5-3)$$

式中： σ_1 ， σ_3 —破坏时最大主应力、最小主应力；

σ_c —岩块单轴抗压强度；

m_i ， s_i —完整岩块的 m ， s 值，完整岩石 $m_i=1$ ， $s_i=1$ ；

m ， s —岩体力学参数的随机变量。 m ， s 值的大小取决于岩石的矿物成分、岩体中结构面的发育程度、几何形态、地下水状况及充填物性质等。

根据野外岩体的地质特征和岩体的 RMR 分类得分与岩体强度参数的关系，就可以估算岩体弱化后的强度参数值。

当 $\sigma_3=0$ 时，可导出弱化后的岩体单轴抗压强度 σ_{mc} 为：

$$\sigma_{mc} = \sqrt{s}\sigma_c \quad (5-4)$$

当 $\sigma_1=0$ 时，可得弱化后的岩体单轴抗拉强度 σ_{mt} 为：

$$\sigma_{mt} = \frac{1}{2}\sigma_c[m - \sqrt{m^2 + 4s}] \quad (5-5)$$

岩体粘结力为：

$$C_m = \frac{\sqrt{\sigma_{mc}\sigma_{mt}}}{2} \quad (5-6)$$

国内外大量研究结果表明，岩块试验结果中 C 值远大于现场岩体抗剪试验结果，而 ϕ 值一般相差不大，故 ϕ 值取折减系数 1。

弹性模量的折减系数一般可以由现场承压板变形试验成果和室内岩块变形试验成果进行对比得到。根据前人作过的相类似的试验，取弹性模量的折减系数为 0.25。另外，由于泊松比对外界条件的变化不敏感，所以泊松比折减系数取 1，抗拉强度折减系数取 0.2。

由上面相关的岩体强度工程折减计算方法，可以求出弱化后的岩体强度大小，结果见表 5-1。

弹性模量: $K_E = 1/4$

泊松比: $K_\mu = 1.0$

内摩擦角: $K_\phi = 1$

抗压剪强度: $K = 0.6$

抗拉强度: $K = 0.2$

表 5-1 理论计算用到的主要力学参数

岩石	密度 (g/cm ³)	抗压强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	泊松比	抗拉强度 (MPa)	粘结力 (MPa)	内摩擦角 (°)
大理岩	2.82	49.8	0.075	0.22	0.432	3.14	34.1
硅辉石角岩	3.28	128.4	0.065	0.21	1.176	6.3	39.4
矽卡岩	3.61	114.9	0.08	0.21	1.746	4.98	37.7
平均值	3.24	97.7	0.073	0.21	1.118	4.81	37.7

顶板安全厚度确定区主要岩性为矽卡岩, 因此, 在理论分析计算中, 采取了比较保守的做法。计算岩体自重应力时, 其岩体容重取密度最大的矽卡岩, 重力加速度 g 为 10m/s^2 。在做岩体强度分析时, 抗拉、抗压极限强度和抗剪极限强度取折减后三种岩石中的最小值, 即大理岩的抗拉强度 0.432MPa 和矽卡岩的抗压强度 1.746MPa 。弹性模量、内摩擦角和泊松比取三者的平均值, 即分别取 0.08GPa 、 37.7° 和 0.21 。在此计算前提下, 保证理论分析具有足够的安全性与工程保险系数, 以确保露天开采时人员与设备的作业安全。

在 FLAC^{3D} 围岩稳定性分析中, 岩体变形参数采用的是体积模量(K)和剪切模量(G)。因此, 必须将弹性模量(E)和泊松比(μ)转化成体积模量(K)和剪切模量(G), 转化公式为 (5-7) 和 (5-8):

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (5-7)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (5-8)$$

计算时模型的边界条件为: 在计算模型的左边界和右边界的水平位移设为零, 将模型的下端设定垂直方向的位移为零。

5.3 露天台阶开挖前后围岩应力场分析

5.3.1 开挖前初始的应力场分析

在计算中把地层概括为一个整体，即砂卡岩。在数值分析模型中加上位移边界条件，并实施重力荷载后，可对初始地应力场进行模拟计算，初始地应力场的实质就是原始地应力场。露天台阶开挖前进行围岩初始应力场模拟是十分必要的，让整个体系达到初始平衡状态。

图 5-5 和图 5-6 显示了初始竖直地应力和水平地应力等值线云图，很明显，围岩初始地应力随围岩深度呈曲线性增加，模拟区域竖直最大应力为 3.5Mpa，水平方向的最大主应力为 2.014 Mpa，空区的存在对水平应力的分布有一定的影响。

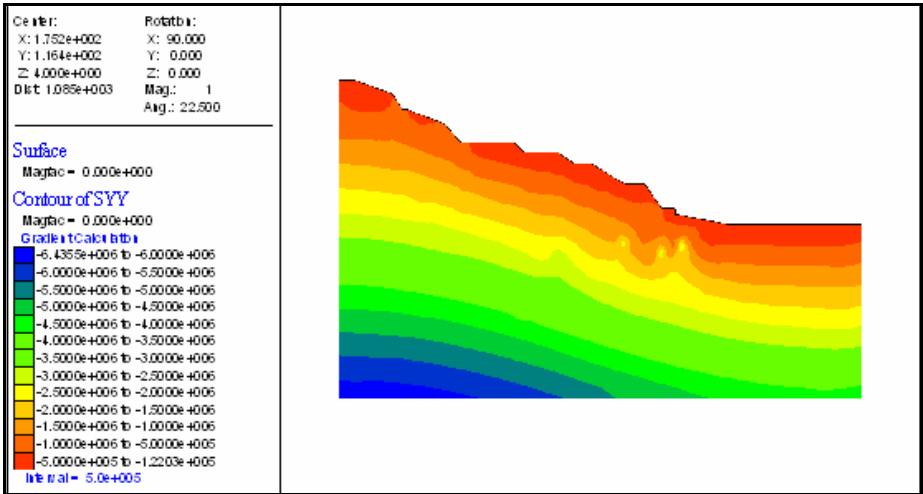


图 5-5 y 方向竖直初始地应力等值线云图

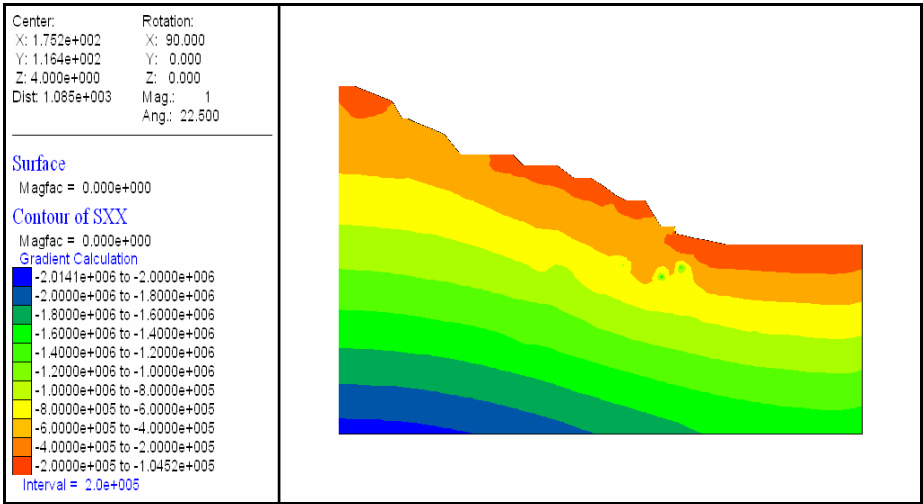


图 5-6 x 方向竖直初始地应力等值线云图

5.3.2 露天台阶开挖后围岩应力场分布

前面已经提到，每次模拟台阶开挖长度、高度和实际一致，即每次开挖一个台阶，由于露天矿的台阶范围较大，所以只考虑空区所在上部的 6 个台阶。在计算台阶开挖时分为 15 步，大约在 59000 时步后完成全部数值模拟过程，不考虑渗流作用时，露天台阶开挖过程中围岩最大不平衡力时程发展曲线如图 5-7 所示，其中最大不平衡力发生突变的点代表露天台阶开挖一个台阶，然后围岩应力通过调整又逐渐趋于平衡。

露天台阶全部开挖后围岩垂直应力场和水平应力场云图分别如图 5-8 和图 5-9 所示。从图中可以看到，由于对露天台阶进行开挖，导致岩体内部应力场进行重新分布，这个现象在空区周围尤其突出，使得空区周围局部围岩出现了较大的应力集中现象。而在远离空区部分，应力大致还是呈现随深度增加的趋势。

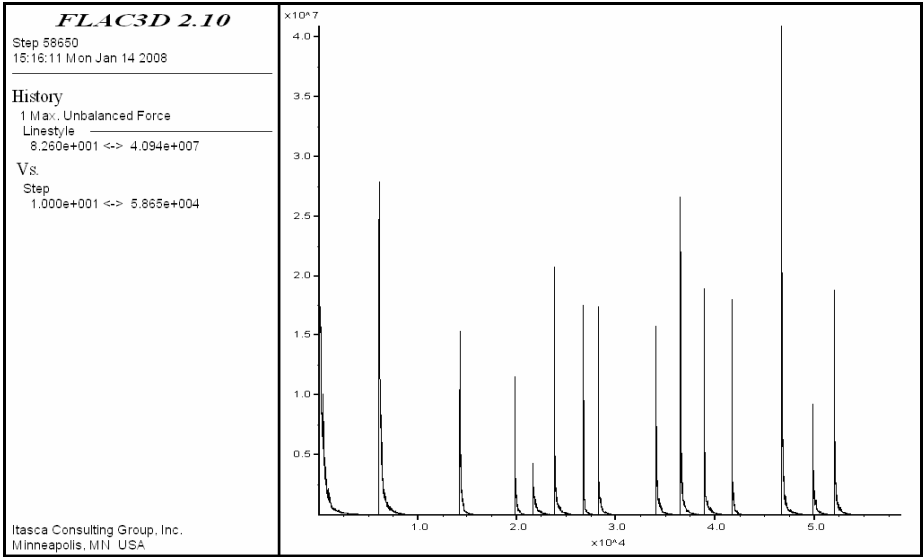


图 5-7 最大不平衡力时程发展曲线

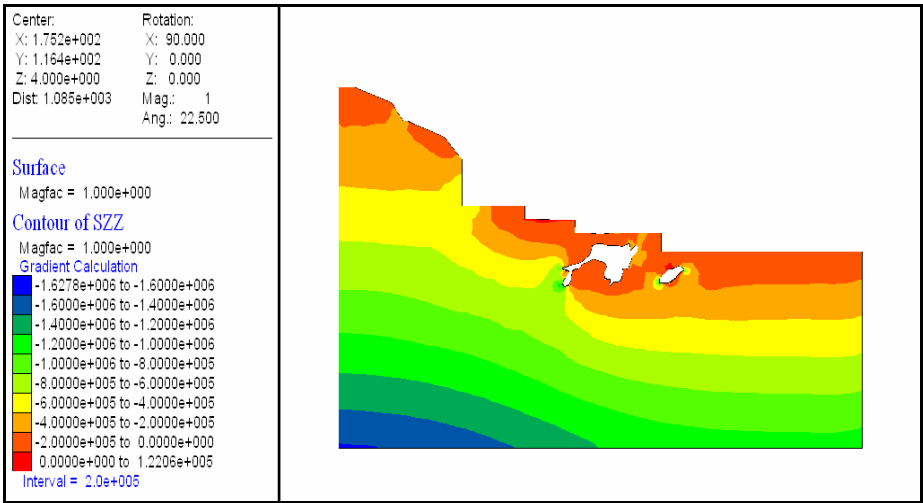


图 5-8 露天台阶开挖后围岩竖直应力 σ_{zz} 等值线云图

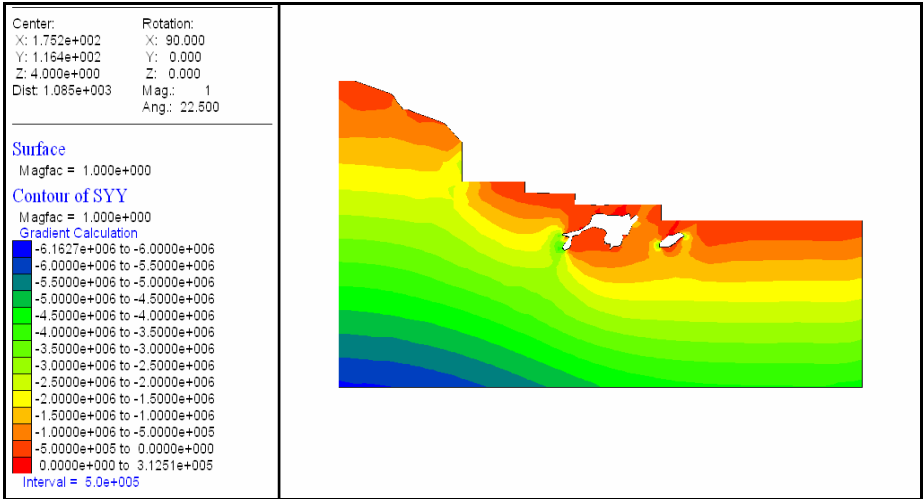


图 5-9 露天台阶开挖后围岩竖直应力 σ_{yy} 等值线云图

图 5-10 和图 5-11 为露天台阶开挖到空区上部 8m 左右处的最大主应力和最小主应力等值线云图。由于 FLAC^{3D} 中规定压应力为负，拉应力为正，所以从图中可见，最大主应力云图在 1438-1 水平空区的右上角部位中出现了拉应力，在 1414 水平空区顶板的上部出现了最大拉应力，最大的拉应力达到了 0.609Mpa，而最小主应力云图中主要为空区周边一些地方出现了压应力集中，在 1414 水平空区的右上角和左下角部分地区受到的最大压应力达到了 6.16Mpa，在露天台阶开挖影响区域以外围岩最大主应力和最小主应力仍然与空区埋藏在台阶以下的深度呈比例增加关系。

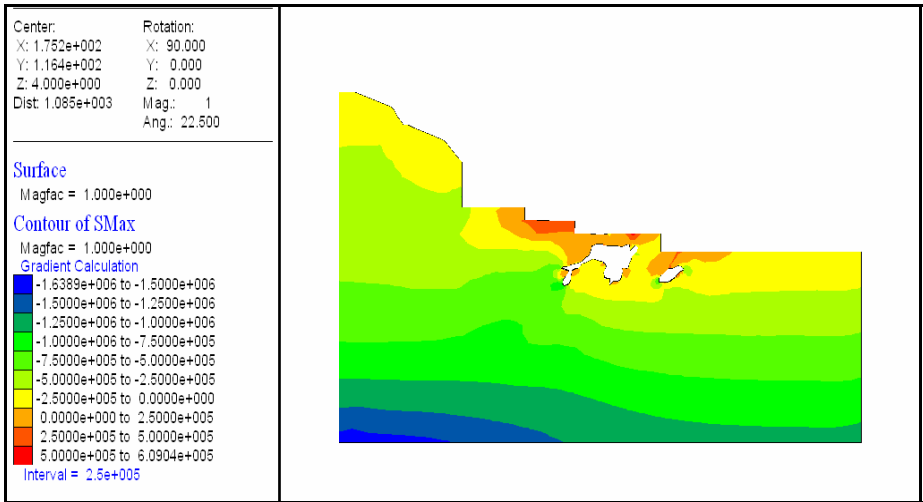


图 5-10 露天台阶开挖后围岩最大主应力等值线云图

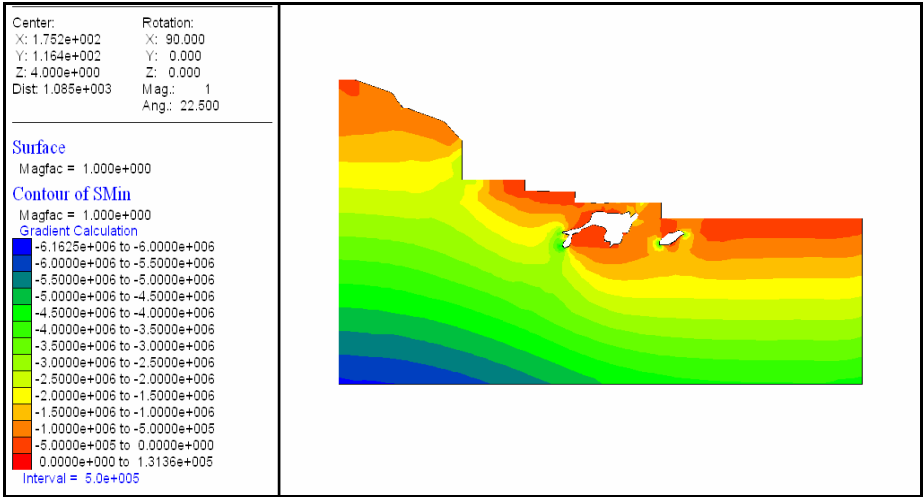


图 5-11 露天台阶开挖后围岩最小主应力等值线云图

5.4 露天台阶开挖后围岩位移场分析

数值分析区域的围岩在露天台阶前进行初始平衡计算时，在围岩自重体力作用下，会有一定初始位移，但实际情况是台阶开挖前围岩所有方向的位移应全部为零，故在进行台阶开挖分析之前，应将初始平衡计算时的全部位移值和速度值清零，这在数值计算程序中已经实现，这样台阶开挖后得到的围岩位移场即为真实位移场。

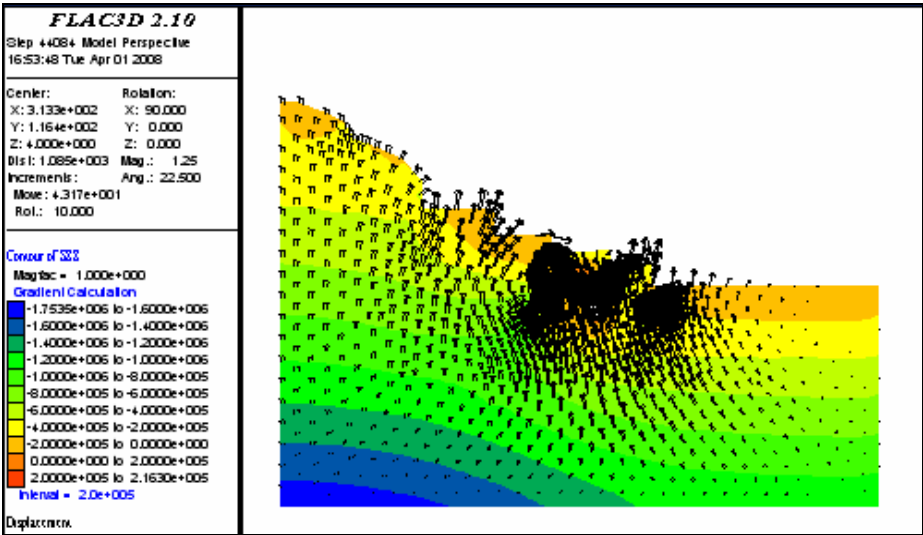


图 5-12 露天台阶开挖前 5 步竖向位移场及其位移矢量分布

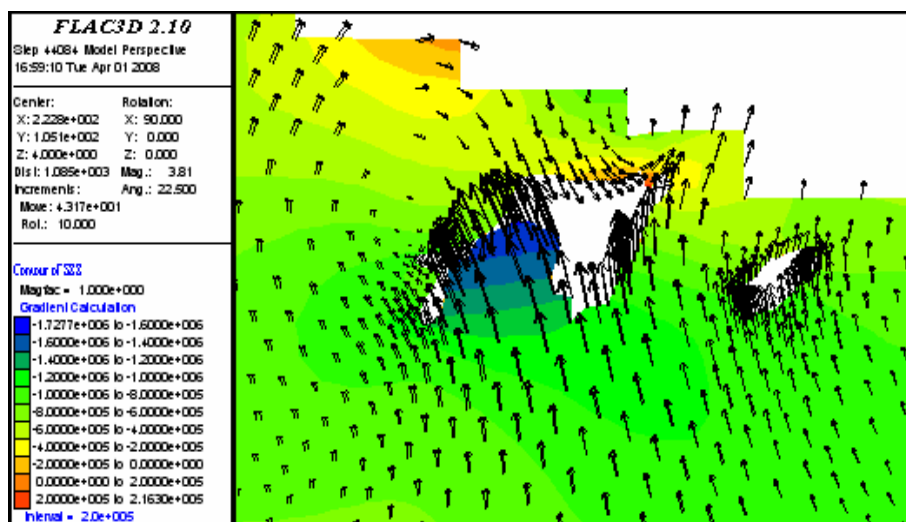


图 5-13 露天台阶开挖前 5 步水平方向位移场及其位移矢量分布

图 5-12 和图 5-13 是露天台阶开挖前 5 个台阶时，空区所在的断面处竖向位移等值线云图和水平位移等值线云图及其相应位移矢量分布。

从图中可见，左右两个空区对露天台阶开挖时围岩位移场有着重要的影响，1438-1 空区的体积较大，从上图可以看出，开挖 1438-1 水平空区上的台阶时，空区顶板围岩向台阶上表面移动，空区上方围岩位移量很小，前 5 步开挖基本上对 1438-1 空区上的台阶不会产生很大影响；但是在 1414 水平空区，其顶板垂直方向的位移为 62.1 mm，从开挖前 5 步计算结果来看，空区对 1414 水平空区以上的露天台阶开挖产生很大影响，且在应力应变图上可以看出，应力发生了集中，且主要在空区顶板，所以，该空区上面台阶极可能坍塌。计算结果和实际情况基本一致，在探测空区期间，1414 水平空区在就曾周围台阶一次爆破震动中坍塌。

露天台阶开挖到 15 步后，空区上面台阶的竖向位移等值线云图和水平位移等值线云如图 5-14 和图 5-15 所示，1438-1 水平空区在垂直方向位移为 188 mm，在数值模拟过程中，应力应变图上突然出现了应力集中，应力集中在空区右上角，由此可知 1438-1 水平空区在开挖带 15 步时已经坍塌。

由于在模拟前 1438-1 水平空区距露天台阶的距离为 29.4m，在开挖前 5 步后空区距台阶的距离为 15.8m，此时该空区并没有发生大的位移，但是在计算到 15 步后，空区距 15 步开挖后台阶的高度为 7.1m，此时、该空区在垂直方向发生了大的位移，位移量达到 180mm，且从应力应变图上可以看出应力出现了集中，应力集中在空区的右上角，所以该空区右上角极可能发生坍塌，由此可知 1438 水平空区顶板的隔离层厚度小于 15.8m，但是必须大于 7.1m，在计算过程中发现，位移云图出现大范围的变化是在计算步骤的中后期，因此、取 1438-1 水平空区的顶板隔离层厚度为 15 m，而对于 1414 水平空区来讲，计算之前距台

阶的垂直距离为 15.8m，在开挖之前没有发生坍塌，但是在前 5 步开挖后，空区距台阶的垂直高度为 8.89m，计算结果得到竖直方向发生了 62.1mm 的位移，位移量相对较小，空区可能发生坍塌，由此显示该空区的安全顶板的隔离厚度在 8.89m 到 15.8m 之间，在计算的过程中发现，位移云图出现大范围的变化在计算步骤的中期，因此，确定该空区的顶板隔离层厚度为 12m。

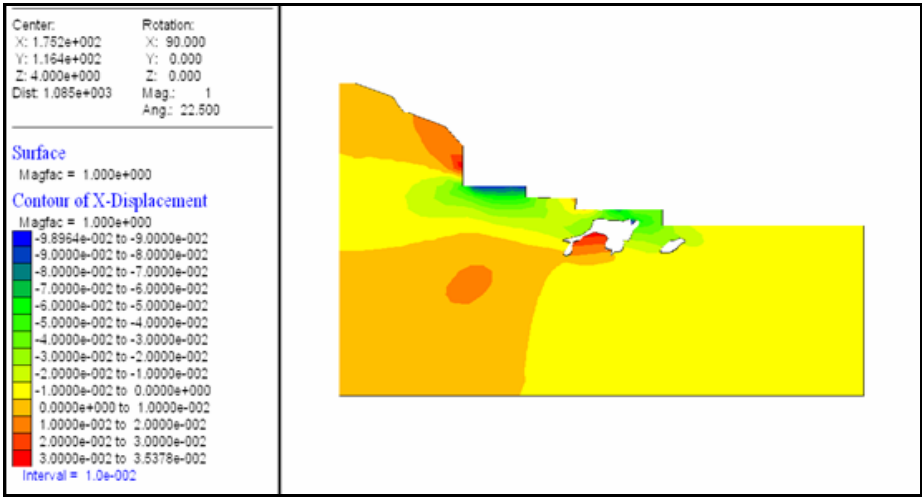


图 5-14 露天台阶开挖 15 步 x 方向竖向位移等值线云图

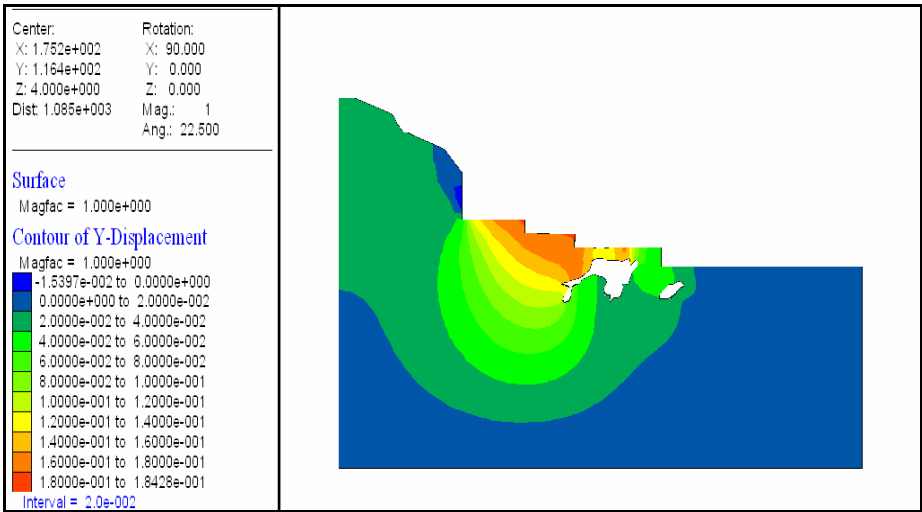


图 5-15 露天台阶开挖 15 步 y 方向竖向位移等值线云图

图 5-16 是 1438-1 水平空区在上一个台阶大爆破后露天台阶发生坍塌的情况，通过对现场的勘查，坍塌空区在计算模型的左上角，通过软件计算得到空区的体积为 $1.5 \times 10^3 \text{m}^3$ 。



图 5-16 1438-1 水平空区在周边台阶爆破后坍塌一角

5.5 本章小结

本章利用 $FLAC^{3D}$ 数值计算软件对露天矿台阶开挖时台阶下面存在空区进行了数值模拟计算，分析了围岩应力场和位移场的分布情况。主要得到如下一些结论：

(1) 在露天台阶剥离时，台阶剥离对空区以上围岩应力场和位移场分布有较大影响，但在最后全部开挖完之后，顶板围岩应力场在空区的顶角最大，最大拉应力达到 0.609Mpa ，最大压应力达到了 6.16Mpa 。

(2) 露天台阶开挖 5 步后，1414 水平空区，竖直方向的位移量在 62.1mm 左右，该空区可能发生坍塌，在模拟开挖 15 步以后 1438-1 水平空区的竖直方向的位移达到了 180mm 左右，此时该空区已经发生了坍塌。从未开挖之前地表应力应变值来看，露天台阶在长时间未开挖和在大型设备的运动下，台阶面会发生一定的下沉，但是下沉量不是很大。

(3) 在不考虑爆破的前提下，通过对 1438-1 水平空区和 1414 水平空区的数值模拟，得到该矿山 1438-1 水平空区的安全隔离层厚度为 15m ，1414 水平空区安全隔离层的厚度为 12m 。

本章对存在地下空区的露天台阶剥离的数值模拟计算，掌握了露天台阶开挖时空区顶板围岩应力场和位移场的基本分布规律，并且得出了矿山的安全隔离层厚度，对矿山的安全生产有一定的指导意义。

第六章 结论和展望

6.1 本文的主要研究成果和结论

本文结合工程实际,运用 Surpac 软件的方法、原理和工具建立了矿山三维模型,并提出了建立栾川三维矿山模型及其应用的流程、内容和方法,利用这些原理和方法建立了包括地表、露天坑和矿体的三维模型,为矿山应用奠定了坚实的基础,并能为以后从事三维矿山建模、开发和应用提供参考和借鉴。并借助先进的空区探测仪器 C-ALS(三维激光空区探测系统),在空区位置已知的前提下,通过地表连接空区的钻孔,能够探测出空区在整个矿山中的具体位置、形状和体积等一些有效数据,并为矿山工作人员提供准确的空区数据,确保安全生产;运用 Surpac 软件中的切面功能,切取的计算剖面通过了 1438-1 水平空区和 1414 水平空区,然后再导入 FLAC^{3D} 软件进行数值模拟计算,得到空区应力场、位移场的变化情况,同时,在不考虑爆破条件下得到空区顶板安全层的厚度。

本论文主要得到以下结论如下:

(1) 提出了在建立三维矿山模型之前,必须结合矿山实际情况,详细分析地质资料和建模的目的,确定建模的最佳流程和方法。

(2) 结合 Surpac 软件所需要的地质数据库结构要求和栾川钼矿三道庄矿的实际情况,对收集的矿山工程资料进行了分析和规范。采用 Excel 表来实现数据库的导入,建立了矿山的地质数据库。

(3) 结合栾川钼矿矿床的实际情况,深入研究理解 Surpac 系统块模型、品位模块的概念、块体模型属性、估值方法和有关术语的含义,采用了距离幂次反比法,建立了矿体的块体模型和品位模型,使矿山工作人员能够清晰的了解矿体品位的分布情况。

(4) 运用 Surpac 软件对矿山总矿体的矿量、体积、矿岩质量进行了计算;并对还未开采的 Mo 矿体质量进行了计算,同时从不同的水平高度对矿体的品位分布、矿体质量分布进行了统计,得出总矿体质量和矿山提供的地质资料中矿体质量基本一致。

(5) 运用了从英国引进的三维激光空区探测仪器,全面地了解空区在露天坑中的空间位置、大小和形状。该仪器具有强大的空区处理能力,能够将探测空区的轮廓全部真实反映出来,并能计算出空区的位置、体积和表面积,同时能将生成的模型导入其它软件中进行编辑和处理。

(6) 将探测出的空区实际大小和形状,通过坐标修正导入到 Surpac 建立好的三维立体模型中,使矿山工作人员从整体上了解空区所在的具体位置,同时能够把空区投影到矿山平面图中,为矿山进行露天台阶的剥离和安全生产提供了安全保证,为矿山对地下空区的处理提供一些宝贵资料。

(7) 运用 Surpac 软件中的切面功能在矿山整个模型中切取有实际意义的剖面进行计算,计算剖面能够真实的反映露天坑、矿体和空区的实际位置,这是其它软件无法办到的,这也是本文的一个创新之处。

(8) 将切取的剖面在 Surpac 软件中进行坐标转换导入 ANSYS,在 ANSYS 中划分网格再导入 FLAC^{3D} 软件进行数值计算,分析了空区在露天台阶剥离时,顶板的应力、应变和位移场变化情况。

(9) 通过计算得到台阶开挖 5 步后,1414 水平空区竖直方向的位移量在 62.1mm 左右,该空区发生了坍塌,在模拟开挖 15 步以后,1438 水平空区的竖直方向的位移达到了 180mm 左右,并且从应力应变图上可以看出应力出现了集中,应力集中在空区的左上角,此时该空区发生坍塌。

6.2 对进一步工作的展望

在导师悉心指导下,经过自己的努力,课题取得了一定的成绩,得出了一些有益的结论。文章虽然花费了不少时间和精力,也有一些心得和体会,但仍然还有许多工作有待进一步深入,作者认为有以下工作急待开展:

(1) 对于现场工作,应尽可能的了解详细,对于现场试验,事先一定要有充分的准备,在得到第一手资料后,要仔细分析和消化。

(2) 由于在建立矿体时,没有考虑矿体围岩模型的建立,在以后的工作中建立对矿体围岩模型和断层模型;另外随着露天台阶的剥离和矿体的开挖,矿体和露天坑要根据矿山提供的数据进行及时修改和完善。

(3) 栾川钼矿地下空区数量很多,但是由于对其探测时间有限,只能将探测出的部分空区导入到 Surpac 建立的模型中,所以在以后的探测过程中需将陆续探测到的空区一一导入到建立好的模型中,并将已经处理和坍塌的空区在模型中清除。

(4) FLAC^{3D} 软件进行数值计算时,并没有把整个空区和露天坑模型导入软件中进行计算,这可能导致计算的结果和真实情况有一定误差,通过课题组的努力,现已能将 Surpac 建立的块体模型导入 FLAC^{3D} 软件中进行计算,但是在计算中还会出现许多问题需要克服。

参考文献

- [1] 李夕兵, 李地元, 赵国彦等. 金属矿地下采空区探测、处理与安全判据[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 24-29
- [2] 高勇, 徐白山, 王启军等. 地下空区探测方法有效性研究[J]. 地质找矿论丛, 2003, 18(2): 126-130
- [3] 程久龙, 胡克峰, 王玉和等. 探地雷达探测地下采空区的研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(增): 79-82
- [4] 李发本, 周子龙, 李夕兵等. 三道庄露天坑采空区探测与有限元模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 895-898
- [5] 童立元. 高速公路与下伏采空区相互作用分析理论与处理技术研究[D]. [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2003
- [6] Raper JF. Key 3D modeling concepts for geoscientific analysis. In: Turner A K (ed), Three- Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems [M]. NATO ASI, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1992: 215-232
- [7] Thomas R. Fisher. Use of 3D Geographic Information Systems in Hazardous Waste Site Investigations [M]. 1993 Oxford University Press. Environmental Modeling with GIS, 1993
- [8] Rongxing Li. Data structures and application issues in 3D geographic information systems [J]. GEOMATICA, 994, 48(3): 209-224
- [9] 李清泉, 李德仁. 三维地理信息系统中的数据结构. 武汉: 武汉测绘科技大学学报, 1996(2): 128-133
- [10] 李清泉. 基于混合结构的三维 GIS 数据模型与空间分析研究[D]. 武汉: 武汉测绘科技大学博士论文, 1998
- [11] 龚健雅、夏宗国. 矢量与栅格集成的三维数据模型[J]. 武汉: 武汉测绘科技大学学报 1997(1): 7-15
- [12] 吴立新, 张瑞新, 戚宜欣等. 三维地学模拟与虚拟矿山系统[J]. 测绘学报, 2002(1): 28-33
- [13] 王纯样, 白世伟, 贺怀建. 三维地层可视化中地质建模研究[J]. 岩石力学与工程学报 2003(11): 1722-1725
- [14] 李讯. 复杂条件下建模技术与岩体开挖稳定性研究. [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学 2006

- [15] 罗周全, 刘晓明, 苏家红等. 基于 Surpac 的矿床三维模型构建[J]. 金属矿山, 2006, (4): 33-36
- [16] 陈爱兵, 秦德先, 张学书等. 基于 MICROMINE 矿床三维立体模型的应用[J]. 地质与勘探, 2004, 40(5): 7-80
- [17] 李海华, 张瑞新. 应用 Surpac 软件进行露天矿采矿工程的可视化[J]. 中国矿业, 200413(1): 63-65
- [18] Gong J Y, Cheng P G, Wang Y D. Three-dimensional modeling and application in geological exploration engineering[J]. Computers & Geosciences, 2004, 30(4): 391-404
- [19] Wu Qiang, Xu Hua. An approach to computer modeling and visualization of geological faults in 3D. Computers & Geosciences, 2003, 29(4): 507-513
- [20] 潘炜, 刘大安, 钟辉亚等. 三维地质建模以及在边坡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 597-602
- [21] Breuning M. An approach to the integration of spatial data and system for 3D geo-information system[J]. Computer & Geosciences, 1999, 25(1): 39-48
- [22] 柴贺军, 黄地龙, 黄润秋等. 岩体结构三维可视化模型研究进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 55-59
- [23] 李培军. 层状地质体的三维模拟与可视化[J]. 地学前缘, 2000, 7: 271-277
- [24] 王英杰, 袁勘省, 余卓渊. 多维动态地学信息可视化[M]. 北京: 科学出版社. 2003, 10
- [25] 曹代勇, 王占刚. 三维地质模型可视化中直接三维交互的实现[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(5): 38-387
- [26] 朱焱辉, 朱培民, 金丹. 从 ArcGIS 平面栅格图形到 Gocad 三维图像转换的开发探讨[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(5): 435-460
- [27] 陈佩佩, 叶勇, 张守仁. 矿山工程软件 Surpac Vision 在煤矿中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(3): 29-31
- [28] 贾明涛, 潘长良. 集成可视化矿床建模软件 DMS 在某矿山的应用[J]. 中南工业大学学报, 2000, 31(5): 396-399
- [29] Chen Ai-bing, Qin De-xin, Zhang Xue-shu. The application of deposit 3D model based on micromine[J]. Geology & prospect, 2004, 40(5): 77-80
- [30] Erarslan, Kaan. Practical approach for 3D modeling of ore bodies and the design of development for underground of mines[J]. Mineral Resources Engineering, Jul 2000, 9(3): 12-16
- [31] Surpac Vision 软件用户使用手册(第四版)[M]. 北京: Surpac software

- International 国际软件公司, 2000
- [32] 蔡美峰. 金属矿山采矿设计优化与地压控制—理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 7-9
- [33] XuZeng-he, XuXiao-he. A cusp catastrophe, Precursors Pattern and evolution process of rock bust of coal Pillar under a hard rock subject to elastic support[J]. Journal of Coal Science&Engineering. 1996, 6: 24-31
- [34] 陈清运, 何玉早. 中小型矿山无底柱分段崩落法结构参数优化[J]. 金属矿山, 2005, 343(1): 23-25
- [35] 施建俊, 孟海利. 采场结构参数与回采顺序的数值模拟优化研究[J]. 有色金属, 2005, 3: 9-13
- [36] 谷兆其, 彭守拙, 李仲奎编著. 地下洞室工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 50-57
- [37] 周思孟. 复杂岩体若干岩石力学问题[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 6-10
- [38] 施建俊, 孟海利, 汪旭光. 数值模拟在矿山的应用. 中国矿业, 2004, 13(7): 53-56
- [39] 唐春安. 采动诱发顶板岩层失稳过程的数值模拟方法[J]. 煤矿开采, 1998(1): 18-20
- [40] 李建林, 哈秋船. 三峡卸荷岩体宏观力学参数三维数值模拟[J]. 武汉水利电力大学(宜昌)学报, 1997, 9
- [41] 龚晓南. 土工计算机分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.1999
- [42] 李宁、辛有良. 岩石力学数值方法的作用与地位浅析[J]. 陕西水力发电, 1997, 6, 19-22
- [43] 周维垣. 岩体力学数值计算方法的现状与展望[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 3, 84-88
- [44] 徐坤. 围岩稳定性综合控制技术的应用[J]. 煤矿开采, 2005, 8: 49-51
- [45] 王明华, 白云. 层状岩体三维可视化构模与数值模拟的集成研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1123-1126
- [46] 肖专文, 龚晓南. 岩体开挖与充填有限元计算结果的可视化研究[J]. 工程力学, 2000(1): 41-46
- [47] 李梅, 董平, 毛善君. 地质矿山三维建模技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(4): 46-49
- [48] 王超凡, 赵永贵, 靳洪晓等. 地震 CT 及其在采空区探测中的应用[J]. 地球物理学报, 1998, 41(增刊): 367-375

- [49] 常锁亮, 张淑婷, 李贵山等. 多道瞬态瑞雷波法在探测煤矿采空区中的应用[J]. 中国煤田地质 2002, 14(3): 70-72
- [50] 段鸿杰, 唐岱茂, 曹为民. 测氦技术圈定采空区影响边界的应用[J]. 华北地质矿产杂志, 1999, 14(1): 71-76
- [51] 祁生文, 孙进忠, 万志清. 瞬态瑞雷波勘探方法的一点改进[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 20(4): 466-467
- [52] 阎长斌, 徐国元, 黄仁东. 探地雷达技术在隧道工程质量验收中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2003, 14(4): 81-84
- [53] 徐国元, 黄仁东, 阎长斌等. 地下空区形态层位探测技术验收报告[L]. 长沙: 中南大学, 2004 年
- [54] Jarosz A. L. shepherd. Cavity Monitoring System(CMS)Survey FATOI and Calibration National Mine Surveying Conference, Darwin, Australia, July2002
- [55] Sagawa Y. Yamatomi J. Stope design in the Hishikari Gold Mine
- [56] Japan, by using numerical analysis[C]. Matthew Handley, DiekStaeey. 10th Congress of the ISRM. Johannesburg: the South Africa
- [57] 岩小明, 李夕兵, 李地元等. 露天开采地下硐室隔离层安全厚度的确定[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(4): 666-671
- [58] 唐春安, 傅宇方, 林鹏. 岩层移动动态过程的数值模拟新方法. 阜新矿业学院学报, 1997, 16 (3): 193-195
- [59] 周小平, 孙运轮, 张永兴. 大厂铜坑矿细脉带采场围岩稳定性数值分析[J]. 地下空间, 2000, 20(4): 290-293
- [60] 高谦, 乔兰等. 地下工程系统分析与设计. 中国建材工业出版社, 北京: 2005, 2
- [61] 赵静波, 高谦, 李莉. 地下采动岩层移动预测理论分析与研究. 矿冶工程: 2004, (3): 1-4
- [62] Laubscher F H. Geomechanics Classification of Jointed Rock Mass - Mining Application [J]. Trans. Instn. Min. Metal, 1997 (86): A₁
- [63] ISRM International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstraces, 1985(22)2:53.
- [64] Swift G M, Reddish D J. Stability problems associated with an abandoned ironstone mine [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2002, 61(3): 227-239
- [65] Nomikos P.P, ofianos AI, Tsoutrelis C E. Structural response of vertically multi-jointed roof rock beams [J]. International Journal of Rock Mechanics &

- Mining Sciences. 2002, 39(1): 79-94
- [66] Diederichs M S, Kaiser P K. Tensile strength and abutment relaxation as failure control mechanisms in underground excavations [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1999, 36(1): 69-96
- [67] Diederichs M S, Kaiser P K. Stability of large excavations in laminated hard rock masses: the outsoar analogue revisited [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 1999, 36(1): 97-117
- [68] 尹士献. 厚黄土覆盖层村镇下条带开采研究. 西安科技大学, 硕士学位论文 2004
- [69] SHAO J F. Poroelastic behavior of brittle rock materials with anisotropic damage [J]. Mechanics of Materials, 1998(30): 41-53
- [70] SHAO J F, HOXHAB D, BARTA Met al. modeling of induced anisotropic damage in granites [J]. International Journals of Rock Mechanics Mining Science. 1999, 36: 1011-1012
- [71] PIETRUSZCZAK S, LYDZBA D, SHAO J F. Modeling of inherent anisotropy in sedimentary rocks [J]. International Journal of Solids and Structures 2002, 39: 637-648
- [72] LYDZBA D, PIETRUSZCZAK S, SHAO J F. On anisotropic of stratified rocks: homogenization and fabric tensor approach [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30: 289-302
- [73] PIETRUSZCZAK S, MROZ Z. Formulation of anisotropic failure criteria incorporating a microstructure tensor [J]. Computers and Geotechnics, 2000, 26: 105-112
- [74] 三道庄矿扩大初步设计说明书, 长沙黑色设计院, 1969 年
- [75] 河南省栾川三道庄矿地质报告, 河南省地质队, 1980 年
- [76] 栾川洛钼集团三道庄矿采空区探测与安全隔离层厚度计算, 中南大学资源与安全工程学院, 2004 年 10 月
- [77] 三道庄铁矿露天采场段高修改设计说明书, 长沙黑色设计院, 1973 年
- [78] 向永生, 孔爱民. 克拉克估值邻域大小的确定方法[J]. 黄金地质, 1998, (3)
- [79] 古德生. 地下金属矿采矿科学技术的发展趋势[J]. 黄金, 2004, 25 (1): 18-22
- [80] 于润沧, 唐建. 略论我国有色金属矿山科技发展战略[J]. 中国工程科学, 2005, 7 (10): 1-4
- [81] Peck J, Gray J. Mining in the 21st century using information technology [J]. CIM Bulletin, 1999, 92 (1032): 56-58

- [82] 李庶林. 论我国金属矿山地质灾害与防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13 (4): 44-48
- [83] C-ALS 空区探测系统软件用户使用手册 (第二版) [M]. The Cavity Scanning Laser System Software International 国际软件公司发行, 2007.1
- [84] 彭欣, 崔栋梁, 李夕兵等. 特大采空区近区开采的稳定性分析[J]. 中国矿业, 2007, 16 (4): 70-73

致 谢

七年的学习和生活一晃而过，在这七年的时间里，无论是在专业知识上，还是在为人处事方面，我都有幸得到了众多师长、同学和朋友热情而无私的关心和支持，这都会使我在以后的成长道路上受益匪浅。在这里我向你们表示最真挚的感谢。

首先要感谢我的导师李夕兵教授。本文是在李老师的精心指导下完成的，不管是从论文一开始的选题、构思还是到后来关键问题的解决，无不凝聚着李老师对学生高度负责的精神和心血。他对问题的独特见解、扎实的理论基础、严谨的治学态度、勤恳的工作作风和高尚的敬业精神，给我留下了非常深刻的印象。在进行论文研究的时间里，李老师对于我提出的每一个问题，不论细小与否，都给予了仔细而认真的回答，对于我文章中的每一个错误都给予了及时的纠正。这些都将会成为我今后学习和工作的榜样，在此对他表示我最深厚的感谢和最诚挚的敬意。

感谢赵国彦教授，他在我读研期间给予了我很大的帮助和鼓励，也为我的学习和工作提出了很多宝贵的意见和经验。从赵老师那里，我学到了很多书本上学不到的东西，增长了很多见识，也掌握了一些处理工程实践的经验和方法。在此也表示真挚的感谢。

还要感谢刘爱华教授、刘志祥副教授、李启月副教授、王卫华老师、曲萍书记、邓义芳高工、薛振纲老师、孙胜老师以及资源与安全工程学院其他很多老师，他们在我读研期间给予了很多关心和帮助，在此一一表示感谢。

感谢我的师兄弟刘希灵、李地元、付玉华、王其胜、宫凤强、刘科伟等人，以及师姐万国香等，还有我的同学黄敏、尹士兵、陈红江、张毅、邵鹏、袁义、楼芬等人，他们在我三年的学习生活中起到了重要的作用，他们给我指点迷津，与我一起探讨专业知识，也与我一起分享着日常生活中的每一个细节。感谢我的朋友吴和平、汤永平等，他们在我论文遇到问题时，积极热情地帮助我。

感谢我的家人和女朋友石得凤，三年的学习，之所以能顺利度过，离不开他们对我的帮助和鼓舞，他们在各个方面照顾我、关心我，特别是生活方面，无微不至，没有他们，也就没有我如今在这作硕士论文的机会。

攻读硕士学位期间主要研究成果

一、参与的主要科研项目

- [1]. 2004.09~2005.8 贵州开阳磷矿马路坪矿通风系统的研究
- [2]. 2007.01~2007.06 江西铜业股份有限公司永平铜矿露转坑地表沉陷规律研究
- [3]. 2007.03~2007.09 河南栾川钼矿三道庄矿地下空区的探测和可视化研究
- [4]. 2007.09~2008.01 河南金源矿业公司罗山矿复杂地质条件下采矿方法及采空区与山体滑波相关性研究

二、发表论文

- [1]. 曾凌方, 李夕兵, 刘希灵等. 栾川三道庄矿地下采空区三维模型的建立与可视化研究[J]. 矿冶工程. 2008 第 3 期
- [2]. 曾凌方, 李夕兵. 马路坪矿井下围岩稳定性监测系统的研究[J]. 采矿技术. 2007,7(1): 40-41
- [3]. 简万国, 曾凌方. 马路坪矿通风系统优化设计研究[J]. 采矿技术. 2005,5(3): 43-45
- [4]. 刘爱华, 赵国彦, 曾凌方等. 矿山三维模型在滑坡体稳定性的分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报. 已录用
- [5]. 石得凤, 朱余德, 张德贤, 曾凌方. 内蒙古锡林浩特市毛登锡铜矿火山角砾岩特征及成矿意义. 湖南矿物岩石地球化学丛论. 2006
- [6]. 张毅, 黄敏, 曾凌方等. 模糊理论在某矿山排土场稳定性分析中的应用[J]. 采矿技术. 2008 年第 4 期

三、获奖情况

- [1]. 2005~2006年度获优秀班导师
- [2]. 2005~2006年度获校优秀学生
- [3]. 2005~2007年度获院优秀党员
- [4]. 2006~2007年度获开拓奖学金(A类)