

# 金属矿山采动岩石力学问题 数值模拟分析

---

JINSHU KUANGSHAN CAIDONG YANSHI LIXUE WENTI  
SHUZHIMONI FENXI

卢宏建 姚旭龙 张亚宾 著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 金属矿山采动岩石力学问题 数值模拟分析

卢宏建 姚旭龙 张亚宾 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2015

## 内 容 提 要

本书以金属矿山采矿工程中突出的岩石力学问题为研究对象,在阐述采矿工程岩石力学问题特点及数值模拟计算步骤的基础上,运用数值计算方法对露天矿山边坡工程、地下矿山采区溜井工程、地下矿山巷道开挖与支护工程、地下矿山滞留采空区工程、地下矿山充填采场相关工程的稳定性问题进行了全面系统的分析和研究,是作者近10年来在金属矿山工程问题数值模拟分析方面进行理论研究和实际应用成果总结。

本书强调理论研究和工程实践的结合,可供从事金属矿山工作的技术人员和管理人员、科研人员以及高等院校矿业类专业师生参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

金属矿山采动岩石力学问题数值模拟分析/卢宏建,姚旭龙,张亚宾著. —北京:冶金工业出版社,2015.11

ISBN 978-7-5024-7080-7

I. ①金… II. ①卢… ②姚… ③张… III. ①金属矿—岩石力学—数值模拟—研究 IV. ①TD31

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第243963号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区高碑院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 [www.cnmp.com.cn](http://www.cnmp.com.cn) 电子信箱 [yjcb@cnmp.com.cn](mailto:yjcb@cnmp.com.cn)

责任编辑 张耀辉 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7080-7

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2015年11月第1版,2015年11月第1次印刷

169mm×239mm;14印张;275千字;216页

55.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 [tougao@cnmp.com.cn](mailto:tougao@cnmp.com.cn)

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

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

冶金工业出版社天猫旗舰店 [yjgcb.tmall.com](http://yjgcb.tmall.com)

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

# 前 言

---

随着计算机技术的发展,多种数值模拟方法应运而生,并在采矿工程领域内得到越来越广泛的应用。目前,数值模拟计算方法已经成为采矿工程岩石力学问题分析、计算、预测预报工程稳定性和可靠性的重要手段。本书对金属矿山采矿工程中边坡、采场、巷道、采空区等具体岩石力学问题进行了数值模拟研究与分析,可为矿山安全生产提供科学的指导。本书主要研究内容如下:

(1) 对数值计算与模拟方法研究现状、采矿工程岩石力学问题特点以及数值计算模拟步骤进行了论述。

(2) 从边坡的稳定性分析方法、岩体力学参数确定、露天终了边坡稳定性分析、边坡加固方案优化等方面对露天边坡工程稳定性研究进行了模拟与分析。

(3) 结合典型矿山采区溜井工程,采用数值分析方法对多分层联络巷连接下采区溜井开挖变形规律与控制、冲击载荷作用下采区溜井破坏机理与加固措施、典型溜井垮冒加固方案进行了系统的介绍。

(4) 结合具体矿山实例,在对矿山工程概况与变形特征调查分析的基础上,提出了巷道分级支护方案,并采用数值模拟计算方法对不同分级方案进行了验证,研究思路和方法对矿山的安全生产具有重要的理论意义和实用价值。

(5) 结合典型矿山滞留采空区工程,采用数值分析方法对滞留采空区工程稳定性评价、监测方案制定、充填治理顺序、充填治理效果进行了系统的介绍。

(6) 结合典型充填矿山实例,从矿床开采方案优化、采场充填料配比、采场开采稳定性分析等方面对地下充填采场相关工程稳定性进

行了模拟计算分析。

本书由华北理工大学卢宏建、姚旭龙和张亚宾结合其科研成果合作撰写，其中部分内容取自作者攻读博士学位期间参加的科研项目，得到了作者博士生导师北京科技大学高永涛教授与课题组吴顺川教授、王艳辉教授的指导和帮助；部分内容为河北省自然科学基金项目（编号：E2014209093）前期研究成果，在此对指导过本书的同志和给予项目支持的河北省自然科学基金委表示衷心感谢。

本书在资料整理、录入、排版过程中，得到了华北理工大学矿业工程学院梁鹏、李嘉惠、张松林同学的帮助，特别感谢他们的辛勤劳动。在本书的撰写过程中，参考了大量的国内外文献资料，在此也向文献资料的作者一并表示感谢。

限于作者的学识和水平，书中不妥之处，恳请同行专家和广大读者批评指正。

作 者

2015 年 7 月

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 1 绪论 .....                    | 1  |
| 1.1 数值计算方法研究与应用现状 .....       | 1  |
| 1.1.1 数值计算方法研究现状 .....        | 1  |
| 1.1.2 数值计算方法应用现状 .....        | 3  |
| 1.2 采矿工程岩石力学问题特点及数值模拟方法 ..... | 6  |
| 1.2.1 采矿工程岩石力学问题特点 .....      | 6  |
| 1.2.2 采矿工程岩石力学问题数值模拟方法 .....  | 7  |
| 1.3 采矿工程岩石力学问题数值模拟步骤 .....    | 9  |
| 1.3.1 确定模型分析目的 .....          | 10 |
| 1.3.2 创建模拟模型图 .....           | 10 |
| 1.3.3 建立和运行简单的理想化模型 .....     | 11 |
| 1.3.4 收集具体问题的数据 .....         | 11 |
| 1.3.5 建立一系列详细的模型 .....        | 11 |
| 1.3.6 完成模型计算 .....            | 12 |
| 1.3.7 提出结果揭示规律 .....          | 12 |
| 2 露天矿山边坡工程稳定性研究 .....         | 13 |
| 2.1 边坡稳定性分析方法 .....           | 13 |
| 2.1.1 工程地质类比法 .....           | 13 |
| 2.1.2 极限平衡法 .....             | 14 |
| 2.1.3 极限分析法 .....             | 15 |
| 2.1.4 数值模拟法 .....             | 15 |
| 2.1.5 模型试验法 .....             | 16 |
| 2.1.6 可靠度法 .....              | 16 |
| 2.1.7 人工智能法 .....             | 16 |
| 2.1.8 反分析法 .....              | 17 |
| 2.2 工程概况 .....                | 18 |
| 2.3 边坡岩体力学参数研究 .....          | 19 |
| 2.3.1 正交试验设计 .....            | 19 |
| 2.3.2 有限元数值分析 .....           | 21 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 2.3.3 RBF 神经网络反分析 .....          | 22  |
| 2.4 露天开采终了边坡稳定性计算 .....          | 24  |
| 2.4.1 模型建立 .....                 | 24  |
| 2.4.2 位移场计算结果及分析 .....           | 25  |
| 2.4.3 应力场计算结果及分析 .....           | 26  |
| 2.5 露天开采终了边坡加固方案 .....           | 27  |
| 2.5.1 加固方案 .....                 | 27  |
| 2.5.2 加固方案稳定性分析 .....            | 29  |
| 2.5.3 加固方案确定 .....               | 38  |
| 3 地下矿山采区溜井工程稳定性研究 .....          | 39  |
| 3.1 多分层联络巷连接下采区溜井开挖变形规律与控制 ..... | 39  |
| 3.1.1 多分层联络巷连接下采区溜井开挖后变形规律 ..... | 39  |
| 3.1.2 溜井支护三维力学响应分析 .....         | 51  |
| 3.1.3 小结 .....                   | 62  |
| 3.2 冲击载荷作用下采区溜井破坏区域与加固措施 .....   | 62  |
| 3.2.1 溜井卸矿过程冲击破坏区域运动学分析 .....    | 62  |
| 3.2.2 某铁矿采区溜井受矿石冲击实例计算 .....     | 67  |
| 3.2.3 采区溜井冲击破坏加固措施研究 .....       | 70  |
| 3.2.4 加固方案稳定性分析 .....            | 71  |
| 3.3 典型垮冒溜井加固方案 .....             | 77  |
| 3.3.1 溜井垮冒概况 .....               | 77  |
| 3.3.2 溜井破坏形式与原因分析 .....          | 78  |
| 3.3.3 支护方案设计 .....               | 79  |
| 3.3.4 加固方案稳定性分析 .....            | 80  |
| 4 地下矿山巷道开挖与支护工程稳定性研究 .....       | 89  |
| 4.1 工程概况与变形特征调查 .....            | 89  |
| 4.1.1 工程概况 .....                 | 89  |
| 4.1.2 巷道支护设计 .....               | 90  |
| 4.1.3 巷道变形调查 .....               | 95  |
| 4.2 巷道分级支护技术研究 .....             | 99  |
| 4.2.1 支护形式与参数选择 .....            | 99  |
| 4.2.2 巷道分级支护研究 .....             | 106 |
| 4.3 巷道分级支护稳定性数值模拟 .....          | 107 |

|       |                           |     |
|-------|---------------------------|-----|
| 4.3.1 | 模拟计算方案 .....              | 107 |
| 4.3.2 | I级围岩模拟计算结果分析 .....        | 110 |
| 4.3.3 | II级围岩模拟计算结果分析 .....       | 118 |
| 4.3.4 | III级围岩模拟计算结果分析 .....      | 126 |
| 4.3.5 | IV级围岩模拟计算结果分析 .....       | 134 |
| 5     | 地下矿山滞留采空区工程稳定性研究 .....    | 143 |
| 5.1   | 滞留采空区稳定性综合分析模型 .....      | 143 |
| 5.1.1 | 滞留采空区稳定性综合分析模型 .....      | 143 |
| 5.1.2 | 工程背景 .....                | 145 |
| 5.1.3 | 稳定性影响分析 .....             | 146 |
| 5.2   | 滞留采空区稳定性监测方案研究 .....      | 149 |
| 5.2.1 | 矿山与采空区概述 .....            | 149 |
| 5.2.2 | 地压监测 .....                | 150 |
| 5.2.3 | 监测系统布置 .....              | 150 |
| 5.3   | 滞留采空区治理顺序优化方法研究 .....     | 160 |
| 5.3.1 | 工程背景 .....                | 160 |
| 5.3.2 | 滞留采空区应力场分布与地表变形规律研究 ..... | 160 |
| 5.3.3 | 滞留采空区充填顺序优化研究 .....       | 167 |
| 5.4   | 滞留采空区充填治理效果分析方法研究 .....   | 168 |
| 5.4.1 | 工程概况与治理方案 .....           | 168 |
| 5.4.2 | 治理效果分析 .....              | 168 |
| 6     | 地下矿山充填采场相关工程稳定性研究 .....   | 175 |
| 6.1   | 复杂地层矿床开采方案优化研究 .....      | 175 |
| 6.1.1 | 工程背景与开采方案 .....           | 175 |
| 6.1.2 | 模型建立 .....                | 176 |
| 6.1.3 | 模拟步骤 .....                | 177 |
| 6.1.4 | 模拟结果分析 .....              | 177 |
| 6.1.5 | 小结 .....                  | 182 |
| 6.2   | 上向分层充填采场充填料配比优化研究 .....   | 182 |
| 6.2.1 | 采场破坏敏感区域有限元分析 .....       | 182 |
| 6.2.2 | 采场分层充填配比优化分析 .....        | 184 |
| 6.2.3 | 小结 .....                  | 193 |
| 6.3   | 上向分层充填采场稳定性分析 .....       | 193 |

---

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 6.3.1 采场参数与模型建立 .....   | 193 |
| 6.3.2 水平关联采场稳定性分析 ..... | 195 |
| 6.3.3 垂直关联采场稳定性分析 ..... | 198 |
| 6.3.4 地表稳定性分析 .....     | 201 |
| 6.3.5 小结 .....          | 203 |
| 附录 .....                | 205 |
| 附录1 正交试验方案数值模拟结果图 ..... | 205 |
| 附录2 BP 参数反演程序代码 .....   | 210 |
| 参考文献 .....              | 213 |

# 1 绪 论

随着实测技术、非连续介质力学、大变形理论、物理模拟技术和计算机数值模拟的发展,使得人们可以从理论分析、现场实测、物理模拟和计算机数值模拟等不同方面来研究采矿工程中的岩石力学问题。然而,现场实测需要大量人力、物力,而且耗时较长,物理模拟的结果虽然比较直观,但受模型尺寸、信息提取和处理技术以及成本和时间的制约,难以分析多因素的影响规律,只能进行定性分析,而现有的力学理论只能解决规则形状开挖工程问题。数值计算分析不仅能模拟岩体的复杂力学和结构特性,也可很方便地分析各种边值问题和施工工艺过程对采矿工程围岩稳定性的影响,并对工程岩体稳定性进行预测和预报。随着矿山岩石力学理论以及数值计算技术的发展,数值计算方法已成为分析采矿工程岩石力学问题的有效方法。在现有理论成熟、计算模型合理以及力学参数正确的情况下,数值计算分析结果完全可以用于指导工程实践。

## 1.1 数值计算方法研究与应用现状

### 1.1.1 数值计算方法研究现状

随着计算机应用的发展,数值计算方法在采矿工程问题分析中迅速得到了广泛应用,大大推动了矿山岩石力学的发展。目前常用的数值方法有有限差分法、有限单元法、无网格法、拉格朗日法、离散单元法及非连续变形分析法等。

#### 1.1.1.1 有限差分法和有限单元法

有限差分法是用差分网格离散求解域,用差分公式将工程问题的控制方程转化为差分方程,然后结合初始及边界条件求解线性代数方程组,得到工程问题的解。有限差分法最早是被用于工程科学,在岩土工程中先应用于渗流和固结问题的求解,后推广应用于弹性地基上梁和板,以及桩基的求解。

有限单元法是将一个表示结构或连续体的求解域离散为若干个子域(或单元),并通过它们边界上的节点(或结点)相互连接成组合体;然后用每个单元内所假设的近似函数来分片地表示全求解域内待求的未知场函数;最后通过和原问题数学模型等效的变分原理或加权余量法,建立求解基本未知量的代数方程组或常微分方程,求解此方程,从而得到问题的解答。有限单元法具有适用性强,处理非均质、非线性、复杂边界问题方便等优点,是目前工程分析中应用最广泛的数值方法。它能应用于土工渗流、固结、稳定和变形分析等各个领域,还可用

于分析浅深基础、挡土墙、堤坝、基坑和隧道等各类岩土工程问题。此外,一些学者还把有限单元法应用于上部结构、基础和地基的共同作用分析。

有限差分法和有限单元法是处理连续介质的最常用分析方法,单元网格均要求结点相互联结,且单元边界保持位移协调,单元刚度组装成总体刚度,设置约束条件等。就目前发展和应用领域来看,有限单元法明显较有限差分法更好,有限差分法多应用于土坝渗流及浸润线的求解、地基固结等问题分析,而有限单元法可广泛应用于边坡工程、隧道工程、地基基础工程、地下工程、堤坝工程、基坑工程等分析。

#### 1.1.1.2 无网格法、拉格朗日法、离散单元法和非连续变形分析法

无网格法是在分析域内安排节点,采用相应的近似函数对场函数进行插值,利用一系列节点的影响在节点领域上建立单位分解函数,再利用伽辽金加权余量法或类似方法建立控制方程组,从中求出节点位移。无网格法最早出现于1977年由Lucy和Gingold等提出的光滑粒子法。但其后发展比较缓慢,直到20世纪90年代,一些学者才逐步对这一方法进行了较多的研究。其种类繁多,根据插值近似函数的不同,可分为基于核函数近似、最小二乘近似和自然临近点近似等无网格法。

无网格法具有以下突出特点或优点:不需要单元网格的划分,从而避免了大量的网格划分工作;节点布置灵活,没有单元网格的限制,可以根据需要变更节点的数量、位置或分布,不增加前处理工作量;为得到离散的代数方程组,仅需要对节点和边界条件进行描述,避免了有限元方法中由于场函数的局部近似所引起的误差;场函数及其梯度在整个求解域内是连续的,无需寻求光滑梯度场的后处理。

拉格朗日法是源于流体力学中跟踪质团运动的一种方法,实际上是连续介质力学中对运动的物质描述方法,是一种求解连续介质非线性大变形的应力分析的数值方法。在岩土工程中材料非线性和几何非线性的问题极为普遍,如地下隧道或巷道的底鼓问题,只能求助于拉格朗日法。拉格朗日法依然遵循连续介质的假设,利用差分格式,按时步积分求解,随着构形的变化不断更新坐标,允许介质有大的变形,可用于进行有关边坡、基础、坝堤、隧道、地下采场、硐室等应力分析。

离散单元法常应用于应力水平不高的情况,块体的弹性变形可以不计而将其视为刚性块体;以受节理裂隙切割成离散的块体为出发点,块与块之间在角和面上的接触处有相互作用;根据岩块的几何形状及其邻接块体的关系,建立运动方程,采用以时步渐进迭代的动态松弛显式解法,求出每一时步块体位置和接触力,反复迭代直到平衡状态。离散单元法是P. Cundall于1971年提出的,于20世纪80年代中期引入我国。此方法特别适用于节理岩体的应力分析,在采矿、

隧道、边坡以及基础工程等方面均有应用。

离散单元法的改进形式很多,如刚性块体法、差异元法、刚性块弹簧法以及非连续分布分析法等,这些改进的形式都应用于岩土工程领域中,主要用于求解多刚体间的接触与碰撞问题。离散单元法的主要特点是块体与其邻接的块体没有连续性要求,即块体运动不需要变形协调,每个块体只是根据其受力的大小按牛顿定律运动,甚至可以脱离母体,因此它可以反映岩块之间滑移、分离、翻滚等大位移。在定性说明岩体的变形和破坏时,离散单元法非常有效,此外还能对破坏机理提供有益的见解。非连续变形分析法是一种用于分析非连续节理岩体的数值方法,是石根华和 Goodman 将离散单元法和有限单元法部分理论体系结合的一种数值方法。非连续变形分析法是用来分析块体系统的力和位移的相互作用的。对每个块体,允许有位移、变形和应变;对整个块体系统,允许滑动和块体界面间张开或闭合。如已知每个块体的几何形状、荷载及材料常数,以及块体接触的摩擦角、黏着力和阻尼特性,非连续变形分析方法即可计算应力、应变、滑动、块体接触力和块体位移。

非连续变形分析法遵循运动学的理论采用动力学方法的计算模式,同时考虑变形的不连续性,求解时按时步渐进计算,使其既可用于计算静力问题,也可用于计算动力问题,既可以计算小位移问题,也可以计算发生破坏时的大位移问题,因此在岩体工程中得到较多的关注和研究。其理论体系严密,总体上有变分原理控制,方程组求解以位移为未知量,属位移法,计算模式与有限单元法相同。非连续变形分析法的特点是:完全的一阶位移近似;严格的平衡要求;完全的运动学及其数值的可靠性;正确的能量守恒和高计算效率。

无网格法不同于其他数值方法的地方是,其不借助于网格而是基于离散结点动态构造近似插值函数,克服了有限单元法和有限差分法等方法中网格生成、网格畸变和网格移动引起的问题,前处理比较方便,这也是它最大的特点和优势,特别是在裂纹扩展、大变形和移动边界等问题处理上。拉格朗日法是针对材料非线性和几何非线性而出现的,对于非线性大变形问题有着独特的优势,是目前岩土工程中进行非线性大变形分析时采用较多的一种数值方法。

离散单元法与非连续变形分析法都是适用于非连续介质如节理岩体的应力分析的数值方法。它们之间的主要区别在于在求解运动方程时非连续分析要像有限单元法那样,基于能量原理形成一个整体矩阵,用隐式方法求解;而离散单元法则对于每个块体按牛顿运动定律列式,不用形成矩阵,按时步逐块松弛,用显式方法求解。

### 1.1.2 数值计算方法应用现状

有限元分析方法最早应用于航空航天领域,用来求解线性结构问题。这是最

早研究并应用于工程实践的数值分析方法,实践证明这是一种非常有效的数值分析方法。有限元法的核心思想是结构的离散化,将实际结构假想离散为有限数目的规则单元系统,即将无限自由度的求解问题转化为有限自由度的问题,通过建立数学方程获得有限自由度的解,这样可以解决很多实际工程中理论分析无法解决的复杂问题。理论已经证明,只要将求解对象离散为足够小单元的系统,有限元法所得的解就可足够精确地逼近于真实值。经历了 40 多年的发展,数值模拟方法的基本理论已经日趋完善,复杂非线性问题各种算法得到很大发展,并在工程领域得到了广泛应用。

近年来随着工程设计、科学研究等要求的不断提高以及计算机计算能力的快速发展,数值力学分析已经成为解决复杂工程分析问题的常规手段,其主要作用表现在以下几个方面:

- (1) 研究工程问题内在的力学机理;
- (2) 增加工程和产品的可靠性;
- (3) 在工程和产品的设计阶段发现潜在的问题;
- (4) 经过分析计算,采用优化设计方案,降低工程和产品的成本;
- (5) 尽快确定工程问题的设计方案,加速产品开发;
- (6) 模拟物理试验方案,减少试验次数,从而减少试验经费。

经过几十年的发展,软件开发商为满足市场需求和适应计算机硬、软件技术的迅速发展,对软件的功能、性能、用户界面和前/后处理能力,都进行了大幅度的改进与扩充。这就使得目前市场上知名的数值分析软件,在功能、性能、易用性、可靠性以及对运行环境的适应性方面,基本上满足了用户的当前需求。

目前各种数值方法的分析软件很多,如国际著名的有限元分析软件有 ADINA、ANSYS、MSC、Midas/gts 等,这些软件功能大而全,但因不是专门为岩土工程问题开发,在解决岩土工程问题时反而不方便,有些甚至很难进行,如分析软岩巷道的大变形问题、采矿工程中顶板垮落等问题时往往很难算下去。而这些软件应用在机械制造、空气动力学等诸多领域,预计的精度非常高。将这些软件应用于岩土工程领域造成的困难,是由岩土工程的力学特性和非连续性所决定的。这促进了专门用于岩土工程问题数值分析软件的开发,如 FLAC、UDEC 软件都是目前国际上公认的优秀岩土力学数值计算软件。

国内也出现了许多商业化的岩土工程软件,如东北大学、同济大学、浙江大学、武汉岩土所等开发的岩土工程软件。

事实上,数值力学分析软件已经成为越来越多领域不能缺少的工具。目前数值力学分析软件的发展主要表现在以下几个方面:

- (1) 与 CAD 软件的无缝集成。在未来相当长的时期内,CAD 软件与数值力学分析软件还会有明显不同的分工,即设计和数据成图工作由 CAD 软件完成,

分析则在数值分析软件中完成。数值分析软件的一个发展趋势是与通用 CAD 软件的集成使用,即在用 CAD 软件完成方案设计后,能直接将模型传送到数值分析软件中进行建模并进行分析计算,如果分析结果不满足设计要求则重新进行设计和分析,直到满意为止,从而极大地提高了设计水平和效率。

(2) 强大可靠的自动建模能力。数值分析求解问题的基本过程主要包括建立分析模型、数值分析求解、计算结果的后处理三部分。对大多数数值分析软件来说,模型细化是建模的关键一步。模型离散后的网格质量直接控制求解时间、结果误差大小,同时软件网格剖分功能也关系到工作效率,因此多种不同网格的处理方法、强大可靠的六面体网格自动划分以及根据求解结果对模型进行自适应网格划分都是软件能力的重要方面。

(3) 由求解线性问题发展到非线性。随着科学技术的发展,线性分析结果已经不能满足复杂设计的要求,许多工程问题所涉及的接触装配、材料破坏与失效、非线性断裂、裂纹扩展等仅靠线性理论根本不能解决,必须进行非线性分析求解。例如薄板成形就要求同时考虑结构的大位移、大应变(几何非线性)和塑性(材料非线性);而对塑料、橡胶、陶瓷、混凝土及岩土等材料进行分析,或需考虑材料的塑性、蠕变效应时,则必须考虑材料非线性。当然大量的流体动力学分析、流场中移动壁面问题、流体/结构耦合分析是更高程度的非线性问题。众所周知,对于与时间相关的强非线性问题,传统的隐式时间积分有时无法满足求解的要求,这时就要求程序在结构和多场分析中都具备显式积分算法。

(4) 由求解结构场发展到耦合场。数值模拟方法最早应用于航空航天领域,主要用来求解线性结构问题,目前数值模拟的发展方向是结构非线性、流体动力学和耦合场问题的求解。例如由于摩擦接触面产生的热问题,金属成形时由于塑性功而产生的热问题,需要结构场和温度场的有限元分析结果交叉迭代求解,即“热力耦合”问题;当流体在弯管中流动时,需要对结构场和流场的有限元分析结果交叉迭代求解,即“流固耦合”问题。由于数值分析方法的应用越来越深入,人们关注的问题越来越复杂,耦合场的求解必定成为数值分析方法和分析软件的发展方向。

(5) 程序的开放性。无论数值力学分析软件如何发展,都不可能满足所有用户的要求。因为很多用户处于工程应用或科学研究的前沿,需要将自己的特性加入到软件中,完成特殊的分析任务。因此开发商必须给用户一个开放的环境,允许用户根据自己的实际情况对软件进行扩充,包括用户自定义单元特性、用户自定义材料本构(结构本构、热本构、流体本构)、用户自定义流场边界条件、用户自定义材料失效、结构断裂判据和裂纹扩展规律,等等。

以上几点,是数值力学分析软件近期的主要发展方向。另外为发挥硬件和软件资源的效能,还大量采用平行处理技术,向软件网络化方向发展。

## 1.2 采矿工程岩石力学问题特点及数值模拟方法

### 1.2.1 采矿工程岩石力学问题特点

采矿工程中突出的岩石力学问题主要包括：矿山地应力场测量技术；露天采矿边坡设计及稳定加固技术；井下开采中巷道和采场围岩稳定性问题；采矿设计优化，包括采矿方法选择、开采总体布置、采场结构、开采顺序、开挖步骤、地压控制、支护加固的优化等；软岩巷道和深部开采技术问题；岩爆、岩爆预报及预处理理论和技术；采空区处理及地面沉降问题；尾矿库稳定性问题。

#### 1.2.1.1 露天边坡工程特点

采矿工程中的边坡有其自身的特点，不同于水利水电工程、公路工程等其他岩体边坡，只有深刻认识这些特点，才能准确地开展滑坡稳定性研究。其特点主要有如下几个方面：

(1) 工程活动的多样性和影响因素的复杂性。边坡工程的复杂性除了表现在地质结构空间分布的随机性之外，还突出表现在：工程活动的多样性，体现在露天开采和地下开采的复合作用，很多露天矿上部边坡加陡、到界、闭坑、内部排土等，同时深部地下采动或露天转地下开采，使得边坡几乎全部处于采矿岩移扰动范围内；影响因素的耦合作用，体现在降雨诱发的水压变化和爆破震动引起的岩体损伤破坏。

(2) 边坡工程的时效性。为了减少初期基建开拓工程量及其费用，缩短基建时间，使露天矿尽快投产，以便产生良好的技术经济效益，露天矿的边坡大多属于临时性边坡，服务年限长短不一，对其稳定性评价的要求亦不尽相同，只要能保证相应期间的生产与安全即可。露天矿边坡工程的时效性决定了其稳定性评价也具有时效性。

(3) 边坡及岩体的可变形性。它不但可以允许边坡岩体产生一定的变形，甚至可以允许产生一定的破坏，只要这种变形及破坏不致影响露天矿的安全生产即可。这就要求在保证在矿山的服务年限内不至于发生大滑坡前提下，确定使露天采矿能取得最大技术经济效益的、最陡的边坡角。

(4) 边坡稳定性认识的阶段性、循环性和动态稳定性。露天矿开采活动贯穿于矿山服务期限的始终，而且露天矿开挖本身就是一种最有效、最直接的工程揭露与勘察，随着露天矿开采，对矿山工程地质条件的认识可以不断地深化，具有阶段性及循环性。可见，边坡稳定是一个动态稳定的过程，为此应尽可能地调节不同阶段的工程地质勘察、评价工作的内容与目标，以便与露天矿的生产及露天矿边坡稳定性评价的不同阶段相适应。

#### 1.2.1.2 地下矿山开采岩石力学问题特点

与一般岩土工程问题相比，地下矿山开采中，围岩的损伤、断裂和失稳是不

可避免的。不像一般岩土工程那样,地下矿山开采中一定要防止这类现象的发生。目前的固体力学还只能对较为理想的弹性、塑性和损伤体进行可靠的变形与受力分析,而在采场顶板的变形、运动与受力分析中,更多的是材料或结构破坏后的力学行为,以及结构破坏和失稳的全过程。另外工作面周围不同区域的岩体,其力学性能变化的差别很大,采动岩体即是一种连续与非连续相复合的复杂介质。对一般的岩土工程问题,材料和结构破坏意味着报废,因而无任何研究价值;而采矿工程问题中,必须研究材料和结构破坏后的力学行为。采矿工程师们更加关心的问题基本上可以划分为以下两大类:

(1) 采场围岩控制问题,即岩体结构是如何破断的,破断后的岩块是否趋于稳定状态,以及结构失稳后的形态变化。

采动应力场是指矿体采出后围岩内重新分布的应力场。它是岩体变形—破裂—运动之源。但由于原岩应力状态及开采后应力场难以测定,其有关的理论描述和现场测定均不成熟。受采动应力场影响,采动岩体会发生变形直至破裂,破裂后的块状围岩体将形成堆砌结构。堆砌结构的失稳即造成岩体运动,直至再形成稳定的块状堆砌结构。

(2) 巷道围岩控制问题,即开挖后围岩移动、变形和破坏导致围岩应力场变化的规律,以及采动影响下巷道围岩控制机理及控制技术。

随着矿体的采出,在采场两侧和前后方围岩内均要形成采动应力集中。在深部开采时,如采场两侧巷道围岩受支承压力峰值影响,必将给巷道围岩控制造成严重困难。现场资料表明,有些巷道受一次采动影响即可全部毁坏,有时则使巷道围岩的变形呈流变状态,并且在一般的支护条件下难以克服。由于工作面周围巷道服务时间短,这类巷道虽变形较大,但只要在巷道服务期内能保证巷道的正常安全使用即可。

### 1.2.2 采矿工程岩石力学问题数值模拟方法

从数值模拟方法的发展历史和采矿工程问题的特点看,采矿工程数值模拟方法必须要反映采矿工程问题的特点,在数值模拟软件的取向上更偏重于能反映采矿工程问题特点的专业化软件。实际上,开采引起的围岩移动变形有其自身的规律和特殊性,因此要结合采矿工程问题的特点,对采矿工程数值力学分析方法的各个方面,包括数值计算方法、模型的合理范围、模型的边界条件等进行专门的研究。

#### 1.2.2.1 矿山地应力场模拟技术

地应力是存在于地层中的天然应力,它是引起采矿、水利水电、土木建筑、铁道、公路和其他各种地下或露天岩土开挖工程变形和破坏的根本作用力,是实现采矿和岩土工程开挖设计和决策科学化的必要前提。因为对矿山设计来讲,只

有掌握了具体工程区域的地应力条件,才能合理确定矿山总体布置,选取适当的采矿方法,确定巷道和采场的最佳断面形状、断面尺寸、开挖步骤、支护形式、支护结构参数、支护时间等,从而在保证围岩稳定性的前提下,最大限度地增加矿石产量,提高矿山经济效益,实现采矿工程的优化。

由于采矿工程的复杂性和形状多样性,利用理论解析的方法进行工程稳定性的分析和计算几乎是不可能的。随着计算机的应用和各种数值分析方法的不断发展,采矿工程正成为一门可以进行定量设计计算和分析的工程科学。

#### 1.2.2.2 岩体力学参数反演技术

我国《国家工程岩体分级标准》主要依据两项指标来评价岩体的工程质量,即岩石的强度和岩体的完整性。各个国家的标准大体上都是这个思路,如国际著名的岩体工程质量分级标准——Barton 分类标准,给出了定量的评价体系,以此来评价工程岩体的质量。但这些分类标准都没有给出岩体力学参数的合理确定办法。实际上,数值模拟结果的准确性,很大程度上取决于岩体力学参数确定的可靠性。因此需要研究岩体力学参数的合理确定办法,特别是对峰后岩体和采动破碎岩体的力学特性进行研究。

#### 1.2.2.3 采矿设计优化技术

矿床的形成过程、赋存状况和开采稳定性均受地应力场的控制,为此必须以地应力为切入点进行金属矿采矿设计优化,即:根据实测地应力和扎实的工程地质、水文地质及矿岩物理力学性质等基础资料,以及实际的矿体赋存和开采条件,通过定量计算和分析,选择合理的采矿方法,确定最佳的开采总体布置、采场结构参数、开采顺序、支护加固和地压控制措施,实现安全高效的开采目标。

优化路线如下:基础资料采集→初选方案确定→多方案定量计算分析→多目标优化决策→工程技术实施→现场监测和反分析→修改和完善方案。

该理论充分地考虑到采矿岩体的非线性特征及采矿的多段性开挖特点,成功地应用数值分析、人工智能等现代的计算和分析技术,为实现采矿设计从传统的经验类比向科学的定量计算转变提供了有效途径。

#### 1.2.2.4 大型深凹露天矿边坡设计优化

国内外边坡稳定性分析和设计的传统方法是极限平衡法,这是一种静态的确定性分析方法,而实际的边坡状况是随开采过程不断变化的,是动态的、不确定性的。该方法是基于王力学理论提出来的,不考虑实际的岩体条件,如断层、节理的存在,同时也不考虑地应力。而实际上这些对边坡的稳定性和破坏起控制作用。因而该方法对山坡露天矿设计可能是适用的,但对深凹露天矿设计并不适用。采用现代科学技术,充分考虑地应力的作用和实际的工程岩体条件,通过定量的计算分析,可以实现边坡设计的优化。

具体的实施路线为:采用数值模拟和极限平衡分析相结合的方法,对不同边