

散体流动 仿真模型及其应用

SANTI LIUDONG
FANGZHEN MOXING JIQI YINGYONG

柳小波 王姜维 王培涛 王连成 著

非外借



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

散体流动仿真模型及其应用

柳小波 王姜维 王培涛 王连成 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2017

内 容 提 要

本书在前人研究的基础上,将随机介质理论和九块模型的思想有机地结合在一起,以矿岩散体为研究对象,分别建立了散体流动空位填充法和散体流动时空演化仿真模型,很好地解决了不同粒径颗粒的流动问题和散体流动的时间过程因素,并在崩落矿岩的流动和岩层及地表沉降仿真方面得到了应用。

本书可作为高等院校采矿工程专业教材,也可供研究散体流动规律的相关专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

散体流动仿真模型及其应用/柳小波等著. —北京:冶金工业出版社, 2017. 10

ISBN 978-7-5024-7624-3

I. ①散… II. ①柳… III. ①矿山—岩石力学—散体力学—仿真模型—研究 IV. ①TD313

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 251107 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 戈 兰 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7624-3

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

2017 年 10 月第 1 版, 2017 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 11.5 印张; 222 千字; 174 页

58.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 yjcbbs@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 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)



前 言

崩落采矿法是一种通过崩落围岩来管理地压的采矿方法，因其具有高效率、成本低、适用范围广等优点，被广泛应用于国内外矿山。在崩落采矿法中，矿石在废石覆盖下进行放矿，很容易造成贫化。矿石的损失贫化既浪费了国家的宝贵资源，降低了矿山经济效益，又加大了生产成本。研究崩落矿岩散体流动规律是进行放矿贫化研究的基础。因此，研究矿岩散体的流动规律，实现放矿的仿真模拟，优化采矿方法的相关参数，对提高矿石回收率、提高矿山经济效益具有重要的意义。目前研究散体流动的理论或模型主要有离散元法、随机介质理论、九块模型等。

本书在前人研究的基础上，将随机介质理论、离散元思想和九块模型思想有机地结合在一起，以矿岩散体为研究对象，分别建立了散体流动空位填充法和散体流动时空演化仿真模型，很好地解决了不同粒径颗粒的流动问题和散体流动的时间过程因素，并在崩落矿岩的流动和岩层及地表沉降仿真方面得到了应用。

散体流动空位填充法在表象方面具有离散元法的优点，在流动过程方面具有随机仿真的优点，是一种快速高效的仿真散体流动过程的方法，为研究崩落矿岩散体流动过程和规律提供了新的研究手段；散体流动时空演化模型是在九块模型和岩石流变学的

基础上建立起来的,其特点是可以快速建立地层和采空区模型,仿真岩层及地表沉降过程,并给出沉降时间,是研究岩层及地表沉降规律的新方法。

本书共七章,内容包括:第1章介绍了当前散体流动的研究现状;第2~4章介绍了提出的三种理论:修正的九块模型理论、非均匀散体流动仿真模型和散体流动时空演化模型;第5章介绍了基于这三种理论所开发的三种软件系统:基于九块模型的三维放矿仿真系统(SLS)、基于非均匀散体流动仿真模型的二维放矿仿真系统(VFMS)和基于散体流动时空演化模型的地表沉降仿真系统(GSS);第6章和第7章介绍了这三个系统在崩落法放矿优化方面和地表沉降模拟方面的应用。

本书是作者们多年研究成果的总结,同时也提出了一些新的理论和观点。在国家数字矿山、智慧矿山建设的趋势下,研发自主知识产权矿业软件是当前采矿研究工作者主要的事情,本书开发了多套仿真系统,供读者借鉴使用。

由于作者水平有限,不妥之处在所难免,敬请广大读者指正。

编 者

2017年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 散体流动仿真方法简介	2
1.2.1 离散元法在散体流动方面的研究现状	3
1.2.2 随机介质在散体流动方面的研究现状	9
1.2.3 九块模型在散体流动方面的研究现状	12
1.2.4 非均匀散体流动仿真研究现状	12
1.3 散体流动仿真方法研究的意义	13
第 2 章 离散元法和 D. Jolley 九块模型研究	14
2.1 离散元法理论及其应用研究	14
2.1.1 离散元法基本原理	14
2.1.2 PFC 软件概述	17
2.1.3 PFC 在矿岩散体流动方面的研究	20
2.2 九块模型理论	35
2.2.1 九块模型概述	35
2.2.2 概率赋值模式探讨	37
2.2.3 放矿计算机仿真实验	39
第 3 章 非均匀散体流动仿真模型研究	41
3.1 空位填充法的研究概述	41
3.2 散体颗粒堆放随机模型的建立	41
3.2.1 假设条件	41
3.2.2 散体颗粒堆放模型的初始生成	41
3.3 散体颗粒流动过程分析	42
3.3.1 第一种算法	43
3.3.2 第二种算法	44
3.4 空位填充法与九块模型的区别	47

3.5 空位填充法的应用前景	47
第4章 散体流动时空演化仿真模型研究	48
4.1 岩层单元块流动的流变性质	48
4.2 岩块流动的时间过程及其概率论解释	49
4.3 散体流动时空演化模型的建立	50
4.4 散体流动时空演化模型中参数 α 的计算方法	52
4.4.1 最小二乘法基本原理	52
4.4.2 多项式拟合	53
4.4.3 α 计算实例	55
4.4.4 利用 Matlab 工具估计 α 值	57
4.5 地表下沉延迟时间 t_y	59
第5章 散体流动仿真系统研究与开发	60
5.1 软件开发的关键技术与方法	60
5.1.1 开发语言的选择	60
5.1.2 软件开发的关键方法介绍	64
5.2 基于九块模型的三维放矿仿真系统研发	76
5.2.1 SLS 系统的结构	76
5.2.2 SLS 系统的功能	78
5.2.3 SLS 系统程序流程图	79
5.2.4 SLS 系统的功能界面	81
5.3 基于空位填充法的二维放矿仿真系统研发	84
5.3.1 VFMS 系统程序流程图	84
5.3.2 VFMS 系统的功能和系统模块划分	89
5.3.3 VFMS 系统的运行界面介绍	90
5.4 地表沉降仿真系统研发	90
5.4.1 GSS 系统的功能模块	91
5.4.2 GSS 系统程序流程图	92
5.4.3 GSS 系统运行界面介绍	93
第6章 散体流动仿真系统在崩落法放矿优化方面的应用	95
6.1 无底柱分段崩落法	95
6.1.1 无底柱分段崩落法结构参数概述	95
6.1.2 大参数多分段并行无贫化放矿的无底柱分段崩落法	97

6.2 SLS 系统在崩落法放矿研究中的应用	101
6.2.1 SLS 系统在崩落法放矿方式研究中的应用	101
6.2.2 SLS 系统在崩落法放矿结构参数优化研究中的应用	105
6.2.3 基于 SLS 系统的崩落法矿石隔离层下放矿研究	132
6.2.4 无底柱分段崩落法矿石损失贫化分析	136
6.3 VFMS 在结构参数与矿石回收指标关系研究中的应用	150
6.3.1 第一种算法放矿试验模拟	150
6.3.2 第二种算法放矿试验模拟	153
第 7 章 散体流动仿真系统在地表沉降模拟方面的应用	157
7.1 GSS 系统在某铁矿的应用	157
7.1.1 某铁矿概况	157
7.1.2 仿真模型建立及地表沉降模拟实验	157
7.2 GSS 系统在某金矿的应用	161
7.2.1 某金矿研究背景简介	161
7.2.2 基于 FLAC ^{3D} 的数值模拟分析	162
7.2.3 某金矿地表沉降计算机模拟	164
后 记	167
参考文献	169

第 1 章 绪 论

1.1 概述

散体是由彼此相联系的固体颗粒所共同组成的集合体^[1]。一般体现为各种松散物料,如沙堆、碎石堆、粮食作物、崩落矿石堆等。散体的物理性质介于固体和液体之间。

散体与固体不同。颗粒状的散体具有流动性,仅在一定的范围内能保持其堆积形状,它不能承受或只能承受很小的拉力,但能承受较大的压力和剪力。

散体与液体也不同。液体具有很大的流动性,液体本身没有固定的形状,抵抗剪力的能力很小,但能向各个方向传递相等的压强。散体虽则也能向各个方向传递压强,但不相等。

散体按照它们的聚集状态可以分为黏性散体和无黏性散体。前者具有内摩擦力和黏聚力(初始抗剪力),后者只具有内摩擦力而无黏聚力。这种只具有内摩擦力的散体,称为理想的散粒物料。在采矿工程中,崩落的矿岩就属于黏性散体,也称为非理想散体。

根据介质中是否含有水分和黏结性物质,可以分为理想散体和非理想散体两种。当介质中不含有水分和黏结性物质时,称为理想散体。当介质中含有水分和黏结性物质,颗粒之间具有一定的黏聚力时,称为非理想散体。我们通常所见到的和所研究的散体,例如土、泥砂、浆体及其他粒状、粉状材料,都是非理想散体。在采矿工程中,崩落的矿岩和自然冒落的矿岩就属于非理想散体,采矿的主要目的是采出我们需要的矿石,这过程往往混入废石,造成矿石贫化,增加采选成本,不同的采矿方法混入的废石也不同,崩落采矿法是地下金属矿床开采中常用的一种方法,其特点是崩落矿石放出是在废石覆盖层下进行的,如果放矿参数选择不合理,覆盖层废石很容易掺杂到矿石中,与矿石一起从放矿口放出,矿岩大量混杂,造成放矿贫化。所以,研究崩落矿岩散体流动规律是进行放矿贫化研究的基础^[2]。矿体采出后,形成采空区,其上方岩层失去了支撑,原有的平衡状态被破坏,岩层发生破裂、冒落和移动,形成散体,地表也随之下沉,从而对地表建筑物、构筑物等产生不同程度的破坏。从散体流动的角度去研究岩层及地表沉降规律,是一种新的尝试,对因采空区引起的各种灾害的防治提供了新的研究方法。

当今世界的经济全球化和信息化已成为人类社会发展的总趋势,信息化正在

成为全球贸易、投资、资本流动和技术转移以及社会、经济、文化等一切领域发展的主要推动力。现在信息技术业已成熟,其应用也越来越广泛,其中包括信息技术在矿业中的应用。

所以,利用计算机仿真技术研究矿岩散体的流动规律,找出不同的地质条件的散体流动情况,优化采矿方法和相关参数,控制地表沉降,对提高矿石回收率、减少采选成本、保护地表建构筑物具有重要的理论意义和实际应用价值。

目前研究散体流动的仿真方法或模型主要有离散元法、随机介质模型、D. Jolley 九块模型^[3]、非均匀散体流动方法等。

1.2 散体流动仿真方法简介

以往人们对放矿的研究,多数是通过实验室做一定量的模型实验来进行。物理模型实验的结果比较客观准确,但费时费力,而且很难对多种方案、多种因素进行全面深入的研究。同时,物理实验模拟很难了解放矿时崩落矿岩体内部的移动变化过程,这就好比一个“黑匣子”,只知投入多少,放出多少,但不知其中发生了什么。因此,人们一直企望能有一种简便可靠的方法来弥补物理实验研究的不足,解开“黑匣子”之谜。计算机仿真放矿的实现为此提供了现实的可能。

计算机仿真放矿实际上就是在计算机上做放矿实验。随机模拟是目前应用最为成熟的计算机仿真方法之一,它可以对包括复杂边界条件在内的各种放矿条件及放矿方案进行模拟,不仅能给出各个阶段的放矿结果,而且能展示崩落矿岩移动的全过程,完整地给出崩落矿岩移动规律的三项基本内容——矿石放出体、矿石残留体、崩落矿岩界面移动和混杂过程。

计算机仿真放矿在放矿研究中很广泛、很全面,同时也很方便、快捷,比如说:可以利用随机模拟研究放矿指标与分段回采数目的关系,也可以利用随机模拟研究结构参数对矿石回收指标的影响,包括矿体厚度与矿石回收率关系、矿体倾角与矿石回收率的关系、分段高度与矿石回收率关系、进路间距与矿石回收率关系、放矿步距与矿石回收率关系等。

计算机随机放矿仿真模拟精度很高的,但是由于模型本身的特点。不管是九块模型也好,还是六块等其他模型,都是基于 D. Jolly 模型的,其随机过程仍然是空位递补形式,因其以“块”为基本单元,离散性大是该模型的主要缺点,另外其模拟的相似程度一般较低,现今对于不同矿体赋存条件的边界处理尚没有得到完全解决,概率赋值问题需进一步研究,该问题会在本书中得到解决。

现今,个人计算机的 CPU 处理速度和对图形运算处理上都能满足放矿仿真需要,面向对象的高级语言及三维制作软件的发展,特别是 .NET 技术的出现和发展,已经实现了放矿仿真需要的各种功能和仿真的高度可视化,可以弥补当前放矿软件的不足,使放矿仿真研究达到新的高度。

计算机放矿仿真技术方法很多,包括 GDI+编程技术、OpenGL 编程技术、动态数组技术、数据的存取技术、数据处理技术和坐标变换等。

随着数据处理、图形算法、信息论及计算机编程技术的深入研究,计算机仿真技术研究得到迅速发展。各行业专家综合运用这些技术来研究和开发计算机仿真系统,并在实际中得到应用,取得了很大的成绩,这些研究成果都可为崩落法放矿计算机仿真系统开发与研究提供借鉴。

1.2.1 离散元法在散体流动方面的研究现状

离散元法 (Discrete/Distinct Element Method, DEM)^[4] 的思想源于较早的分子动力学 (Molecular Dynamics)。其主要思想是把整个介质看作由一系列离散的独立运动的粒子 (单元) 所组成,单元本身具有一定的几何 (形状、大小、排列等) 和物理、化学特征。其运动受经典运动方程控制,整个介质的变形和演化由各单元的运动和相互位置来描述。

离散元法的单元从几何形状上分类可分为块体元和颗粒元两大类,如图 1-1 所示。块体元中最常用的有四面体元、六面体元;对于二维问题可以是任意多边形元,但应用范围不广。颗粒元主要采用球体元;对于二维问题采用圆盘形单元。还有人采用椭球体单元和椭圆形单元,但不常用。离散元本身一般为刚体,单元间的相对位移等变形一般由联结于节点间的变形元件 (如弹簧、黏壶 (阻尼)、摩擦元件等) 来实现。

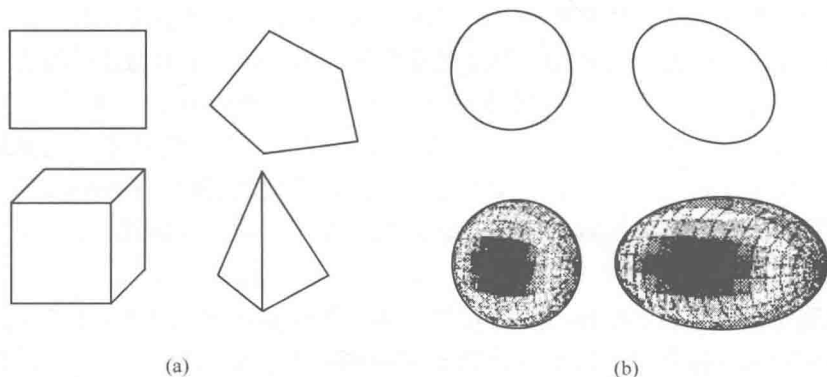


图 1-1 离散元的单元分类

(a) 块体元; (b) 颗粒元

1971 年 Cundall^[5] 提出适于岩石力学的离散元法,1979 年 Cundall 和 Strack 又提出适于土力学的离散元法^[6~8],并推出二维圆盘 (disc) 程序 BALL 和三维圆球程序 TRUBAL (后发展成商业软件 PFC-2D/3D),形成较系统的模型与方法,被称为软颗粒模型;1980 年 Walton^[9] 用来研究散体流动并有所发展;同年 Camp-

bell^[10,11]提出了硬颗粒模型并用于分析剪切流。1989年英国Aston大学Thornton引入Cundall的TRUBAL程序,从发展颗粒接触模型入手对程序进行了全面改造形成TRUBAL-Aston版,后定名GRANULE。它完全符合弹塑性圆球接触力学原理,能模拟干-湿、弹性-塑性和颗粒两相流问题。

Leeds大学等校也利用它进行模拟,在英国DEM研究较深入的还有Surrey大学的Tuzun研究组(以DEM模拟和实验研究见长),Leeds大学的Ghadiri研究组,Swansea大学Owen的研究中心(以有限元-离散元法结合见长)等。在英国多次举办相关主题的学术会议,促进了颗粒离散元法的发展。法国在散体实验方面(如土力学和谷物储运过程)较突出,多数人直接采用PFC-2D/3D进行DEM分析,也有人用类似方法研究,如Radjai^[12]等用力网络法,Moreau^[13]用接触动力学研究剪切区问题。荷兰、德国和加拿大等国也有进展。澳大利亚新南威尔士大学余艾冰(A. B. Yu)的研究中心进行了多方面的DEM模拟,CSIRO(Commonwealth Scientific & Industrial Research Organization)研究所的Cleary用离散元法模拟了不少工程问题。

在日本有5个学术团体(土木工程/土力学和基础工程学会、物理学会、颗粒技术学会、粉体过程工业和工程协会和日本科学促进会)在散体细观力学研究中起了重要作用,多次组织美日间散体力学的理论和方法的研讨会。研究较多的有Saitama大学的Oda,东北大学的Satake和Kishino,大坂大学的Tsuji和Tanaka以及东京农工大学的Horio等^[14],编写了专著系统介绍了散体力学和离散元法。

在对离散元等方法的研究中,又出现了不少改进模型和方法,初步形成以固体接触力学和流体力学为基础、颗粒细观力学为体、颗粒技术为用的具有交叉特征的计算散体力学学科。国际散体细观力学大会自1989年起,先后在法、英、美、日召开,出版论文集^[15-18],其中离散元法研究占有一定比重。世界颗粒技术大会、化学工程大会等也有文章发表。在国际英文期刊中,《Powder Technology》、《Particulate Science and Technology》和《Advanced Powder Technology》常有文章发表。

离散元在我国起步较晚,但是发展迅速。王泳嘉教授于1986年首次向我国岩石力学和工程界介绍了离散元法的基本原理及几个应用例子^[19],并进行了岩石力学和颗粒系统的模拟^[20,21]。现在,东北大学、北京大学、清华大学、中国科技大学、中国农业大学等著名大学和中国科学院力学所、中国科学院武汉岩土力学所、中国铁道科学研究院等著名科学研究部门均有人从事离散元法的研究和应用工作,成果显著。

在崩落法放矿散体移动离散元研究方面,东北大学王泳嘉教授做了很多研究工作,运用离散元法对倾斜壁条件下放矿散体移动进行了模拟^[22,23],并在力场、速度场、滑移线场、放出体、矿岩接触面、矿岩移动迹线、矿石残留体和平衡拱

与整体滑移方面进行了分析，结果表明它能够像现有的模拟放矿的方法一样用于研究崩落法放矿矿岩移动规律和进行矿石损失贫化预测，除此之外，它还能模拟与解释在各种边界条件下的崩落矿岩移动与放出的力学（静力的与动力的）过程，以及做出数量的计算。

在岩层和地表沉降离散元研究方面，文献 [24] 建立了岩移分析离散元模型，一个离散元模型主要包括：（1）边界区域的确定；（2）离散单元的划分；（3）边界条件的处理；（4）加载；（5）开挖模拟。离散元模拟结果与实测结果的对比见图 1-2，由此可见，二者能够很好地吻合。离散元模拟得到的地表最大下沉量 $W_{\max} = 1029\text{mm}$ ，开采影响传播角 $\theta = 78^\circ$ ，均与实测结果接近。不同开采宽度下地表下沉曲线如图 1-2 所示，模拟结果列于表 1-1 中。

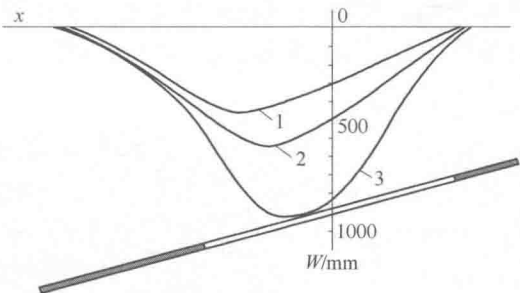


图 1-2 不同回采区段尺寸下地表下沉曲线
1— $l=71\text{m}$ ；2— $l=106.5\text{m}$ ；3— $l=142\text{m}$

表 1-1 离散元法模拟结果

序号	开采区段宽度 l/m	地表最大下沉量 $W_{\max}/\text{mm}$	下沉系数 η	最大倾斜值/ $\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	
				$T_{1\max}$	$T_{2\max}$
1	142	1029	0.610	17.28	17.45
2	106.5	645	0.383	10.68	10.05
3	71	452	0.268	6.88	7.50

文献 [25] 利用二维离散元分析程序 UDEC 对某铜矿山破碎带下采矿产生地表沉陷的地质力学现象进行了数值模拟，得出如下结果：

（1）位移。在矿体开采形成的空区顶板位移很明显，矿柱的位移较大，已经错位变形。地表产生了大小不同的位移分布区，空区正上方位移最大。

（2）塑性区。矿柱基本上全部达到了塑性极限，在采空区的周围形成了相当数量的破坏区单元，上盘相对较大，主要表现为拉伸破坏和剪切破坏。

（3）利用房柱法开采破碎带下矿体时不能很好地控制顶板变形、破坏。应采取其他更为合理的采矿方法或支护方法，确保空区稳定性。

（4）通过数值模拟可以看出利用房柱法开采破碎带下矿体时，空区围岩的

破坏以及地表的沉陷多发生在矿体的正上方和上盘区域，矿体埋藏较浅时，地表沉陷就越明显。

(5) 离散元数值模拟可以很好的验证破碎带下矿体开采引起顶板破坏和地表沉陷的机理。

文献 [26] 采用离散单元法对昌金高速公路金鱼石段路基下采空区的稳定性及采空区对路基稳定性的影响进行了研究。针对钻探和物探提供的采空区分布及采空区几何特征和工程地质情况，建立了离散元分析模型，计算结果表明采空区围岩不稳定，对路基稳定性有显著影响。当采用注浆方法对采空区进行处理后，路基是稳定的，满足高速公路技术标准的要求。

文献 [27] 针对金山店铁矿地下采矿深度的不断增加和采空区的不断扩大而引起的对地表的影响问题，利用 2D-Block 软件进行了模拟，得到了其围岩及地表的变形规律，计算结果为确定该矿地表的移动和陷落范围提供了依据，模拟结果如图 1-3~图 1-5 所示。

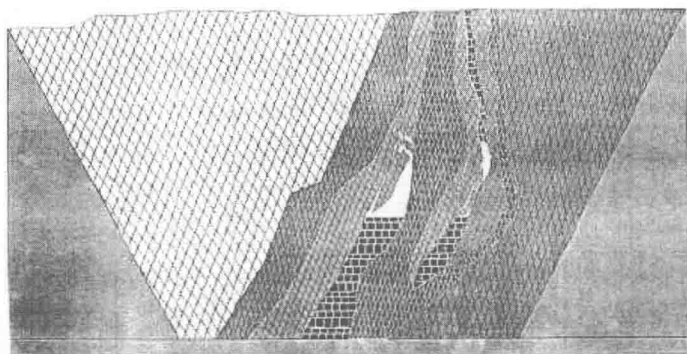


图 1-3 块体变位图 (-200~-340m)

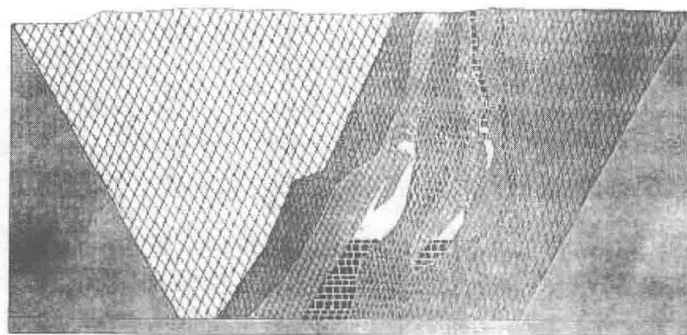


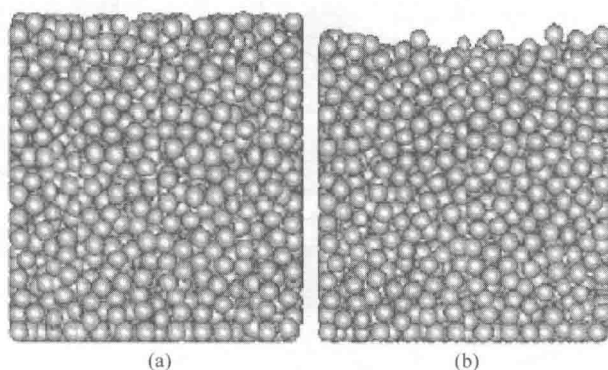
图 1-4 块体变位图 (-200~-410m)

离散元法在散体、颗粒堆积方面也有一定的研究工作。文献 [28] 利用三维 DEM 模拟散粒体在自重作用下的堆积过程。文中散粒体的堆积模拟分两步进



图 1-5 块体变位图 (-200~-550m)

行。首先利用蒙特卡罗法，借助种子数产生球心和半径 (r)，在刚性方形域内 (边长为 a) 随机生成单一粒径球体堆积模型 ($a/r=30$)，为计算的初始状态，如图 1-6 (a) 所示。该过程主要考虑几何空间位置关系，而没有考虑力学平衡机制，其堆积结构不够均匀。第二步，堆积体施加重力，则散粒体因重力作用下落，颗粒间及颗粒与壁间相互碰撞、产生相互的法向和切向作用而发生位移，最终达到稳定状态，如图 1-6 (b) 所示。利用离散单元法，对颗粒受重力、相互间及与壁间的法向和切向作用力的堆积过程进行实例模拟与分析。为消除边界影响，利用回归法外推零边界颗粒系统的密度，方形域边长 a 分别取为球半径 r 的 20、22.5、25、27.5、30 倍。



(a) (b)

图 1-6 堆积形态

(a) 初始状态; (b) 最终状态

文献 [29] 指出离散元法研究颗粒堆积问题也有助于认识堆积的细观力学机理和评估所采用模型的适用性。为此，用颗粒离散元法模拟了颗粒二维堆积问题，采用有级配的粒度分布的圆球颗粒群分析了颗粒摩擦系数、密度及粒度对堆积体止角的影响。模拟结果表明：在同等条件下，颗粒堆积的休止角随颗粒及底

板摩擦系数的增大而增大,随颗粒密度的增大而减小。

文献[30]用作者开发的离散元程序,模拟不同尺寸分布的砂堆形成过程。把散体颗粒简化为圆形颗粒,模拟过程分三步:首先利用参考网格生成颗粒的松散堆积结构;为了避免颗粒下落的冲击作用对砂堆安息角的影响,先模拟颗粒在重力作用下在圆柱容器内的自由下落与堆积,直至堆积达到稳定;最后,移除容器,只保留一个底部边界,模拟颗粒体系的散落过程,直至形成一个稳定的砂堆。模拟结果表明,在其他参数保持相同的情况下,随着颗粒尺寸的减小,砂堆的安息角逐步减小并趋向于一常值。对模拟中的两组颗粒体系进行相同条件下的砂堆形成实验,结果表明,模拟与实验所得安息角大体相当。图1-7所示为五种不同尺寸分布颗粒体系的初始松散结构的一部分,图1-8所示为五组不同尺寸分布颗粒体系形成的最终砂堆。

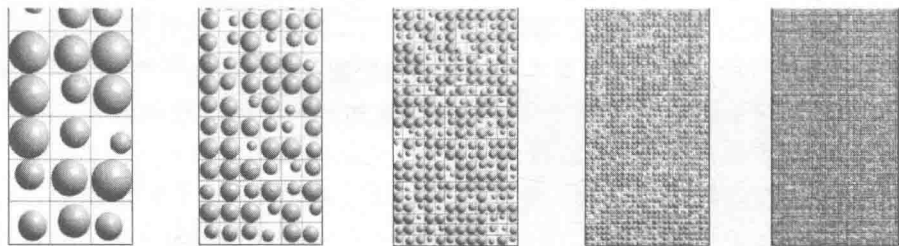


图1-7 五种不同尺寸分布颗粒体系的初始松散结构的一部分

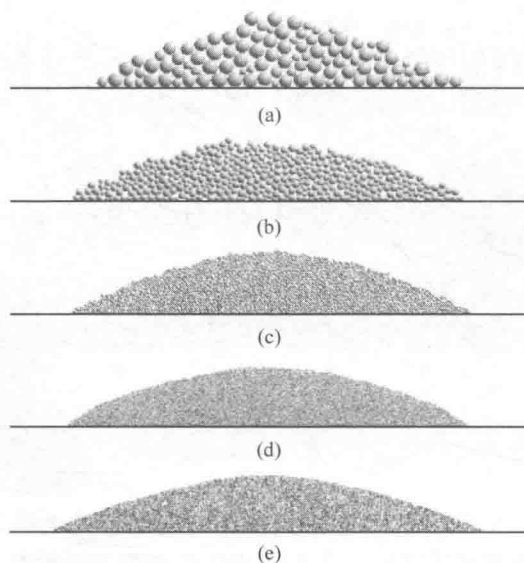


图1-8 五组不同尺寸分布颗粒体系形成的最终砂堆

颗粒离散元法发展比较迅速,在矿冶、岩土、农业等领域都有不少的应用^[1]。料仓卸料是典型的散体颗粒流动过程,Langstong 等^[31,32]用 DEM 对料仓料斗做过系统的研究,Kapui 和 Thornton^[33]用 DEM 研究了二维料仓和三维料斗卸料问题,Masson 和 Martinez^[34]深入研究了力学性质对流动的影响,很多学者还在堆积^[35]、装填、压制^[36]和颗粒混合过程进行了离散元法模拟,取得一定的成果。

王培涛等应用 PFC^{2D} 软件建立的无底柱分段崩落法放矿模型,通过固定分段高度和进路间距,改变炮孔的边孔角来分析开采过程中矿山内部应力场和运动场,以及将矿石回收率和混入率作为放矿指标对平面放矿和立面放矿进行模拟研究^[37]。杨晓炳等针对露天转地下开采设计中回填层废石粒径的选择问题,采用 PFC^{2D} 程序,研究废石相对粒径对矿石损失贫化的影响,进而确定合理的回填层废石粒径来降低放矿过程中的损失贫化率^[38]。李彬、刘志娜、王培涛、朱焕春、张巍元、吴俊俊、安龙、徐帅等,应用 PFC^{3D} 软件进行无底柱分段崩落法单分段单进路单步距模型的放矿模拟^[39~46]。

在 PFC 程序的基础上,Lorig 和 Cundall 于 2000 年开发了 REBOP (Rapid Emulator on PFC^{3D}) 程序,该程序合并了来自 PFC^{3D} 程序仿真所观察到和推论得到的规律,并由 Power 在 JKMRC 实验室通过室内相似材料实验进行确定,并在矿山现场进行了一系列的标定。该程序能够动态显示每个放出漏口所对应的放出体和松动体的演化过程。其体积与 Kvpil 提出的理想椭球体理论中的放出椭球体和松动椭球体的体积相等。REBOP 程序没有关于放出体形态的假设,其三维状态下的形态完全由其微观机制所决定。REBOP 软件的整体目标是在一个矿块崩落法矿山的大背景下开展矿山设计和生产控制。通过 REBOP 可以预测矿石的截止品位及其他崩落矿岩的性质,提供矿石材料移动和相互间干扰的可视化分析^[47]。

其他的离散元程序有 FASTDISC 与 FLOW3D,但是这些程序在进行无底柱分段崩落法放矿模拟过程中均不同程度地受到数值稳定性和计算时间的限制。

1.2.2 随机介质在散体流动方面的研究现状

将崩落矿岩松散介质简化为连续流动的随机介质,运用概率论方法研究其移动过程而形成的理论体系,称为随机介质放矿理论。散体运动的随机介质理论最早由波兰 Jerzy Litwiniszyn 教授于 1956 年提出,他应用概率论方法给出了散体运动的微分方程;1962 年我国东北大学王泳嘉教授给出了放矿平面问题的理论方程,1972 年苏联 B. B 库里柯夫又将平面问题扩展为空间问题。随后东北大学刘兴国教授、任凤玉教授将随机介质方法与散体流动的实际物理过程相结合,于 1994 年出版了《随机介质放矿理论及其应用》一书,对各种边界条件的散体运动过程建立了系统的理论方程^[2,38]。

随机介质理论是把崩落的矿岩视为理想的散体,即规格一致,独立存在,不