



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属

理论与技术前沿丛书
SERIES OF THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL FRONTIERS OF
NONFERROUS METALS

斑岩相关矿床复杂系统的 计算模拟

COMPUTATIONAL MODELING OF THE COMPLEX PORPHYRY-RELATED
DEPOSIT SYSTEMS

孙涛 刘亮明 著
Sun Tao Liu Liangming



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属理论与技术前沿丛书

斑岩相关矿床复杂 系统的计算模拟

COMPUTATIONAL MODELING OF THE COMPLEX
PORPHYRY - RELATED DEPOSIT SYSTEMS

孙 涛 刘亮明 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团

图书在版编目(CIP)数据

斑岩相关矿床复杂系统的计算模拟/孙涛,刘亮明著.

—长沙:中南大学出版社,2016.1

ISBN 978-7-5487-2244-1

I. 斑... II. ①孙...②刘... III. 斑岩矿床-计算-模拟

IV. P611.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第093873号

斑岩相关矿床复杂系统的计算模拟

BANYAN XIANGGUAN KUANGCHUANG FUZA XITONG DE JISUANMONT

孙涛 刘亮明 著

☐责任编辑 刘石年 刘小沛

☐责任印制 易建国

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 湖南鑫成印刷有限公司

☐开 本 720×1000 1/16 ☐印张 9.5 ☐字数 185千字

☐版 次 2016年1月第1版 ☐印次 2016年1月第1次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-2244-1

☐定 价 68.00元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

斑岩型矿床通常被认为是比较简单的，然而许多与斑岩相关的矿床实际却是非常复杂的。本书以两个与斑岩相关矿床(一个铜钼矿床、一个金矿床)为实例，以计算模拟为主要手段，通过三维形态模拟、地质属性场的模拟、分形-多重分形统计模拟和成矿动力学数值模拟揭示矿床的复杂性特征，进而分析非线性成矿动力学机制。内容包括：地学三维计算模拟(形态模拟、属性模拟、动力学数值模拟)的原理和建模方法；分形-多重分形原理及计算方法；通过计算模拟与分形-多重分形分析揭示车户沟斑岩型铜钼矿床以及大王顶斑岩相关金矿床的复杂的空间变化规律及其动力学原因。

本书可作为资源勘查和地理信息系统等相关专业的高年级本科生和研究生的参考书，也可供从事矿床勘查与开发、数字矿山、三维地质建模及动力学数值模拟等方面的科技工作者使用。

作者简介

About the Authors

孙涛，男，1985年生，江西赣州人，理学博士，现为江西理工大学资源与环境工程学院教师。2003年进入中南大学地球科学与环境工程学院就读于地质工程专业，2007年获工学学士学位并于同年进入中南大学地球科学与信息物理学院计算地球科学研究中心开始从事数学地质和地学计算模拟方面的研究，师从刘亮明教授。2014年获矿物学、岩石学、矿床学博士学位。参与3项国家自然科学基金和多项横向课题，在国内外期刊上发表论文5篇，包括作为第一作者被国际SCI收录的论文一篇。

刘亮明，男，1964年生，湖南新邵人，1996年获原中南工业大学(现中南大学)矿产普查与勘探专业博士学位。现为中南大学地球科学与信息物理学院计算地球科学研究中心教授，博士生导师，主要从事矿床预测与勘探、成矿构造以及地质系统计算模拟方面的教学与研究。已在该领域发表学术论文100篇以上，其中被SCI收录论文超过20篇，获教育部自然科学二等奖2项，有色金属工业科技进步一等奖1项。

学术委员会

Academic Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

王淀佐 中国科学院院士 中国工程院院士

委 员 (按姓氏笔画排序)

于润沧	中国工程院院士	古德生	中国工程院院士
左铁镛	中国工程院院士	刘业翔	中国工程院院士
刘宝琛	中国工程院院士	孙传尧	中国工程院院士
李东英	中国工程院院士	邱定蕃	中国工程院院士
何季麟	中国工程院院士	何继善	中国工程院院士
余永富	中国工程院院士	汪旭光	中国工程院院士
张文海	中国工程院院士	张国成	中国工程院院士
张 懿	中国工程院院士	陈 景	中国工程院院士
金展鹏	中国科学院院士	周克崧	中国工程院院士
周 廉	中国工程院院士	钟 掘	中国工程院院士
黄伯云	中国工程院院士	黄培云	中国工程院院士
屠海令	中国工程院院士	曾苏民	中国工程院院士
戴永年	中国工程院院士		

编辑出版委员会

Editorial and Publishing Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

罗 涛(教授级高工 中国有色矿业集团有限公司原总经理)

副主任

邱冠周(教授 中国工程院院士)

陈春阳(教授 中南大学党委常委、副校长)

田红旗(教授 中南大学副校长)

尹飞舟(编审 湖南省新闻出版广电局副局长)

张 麟(教授级高工 大冶有色金属集团控股有限公司董事长)

执行副主任

王海东 王飞跃

委 员

苏仁进 文援朝 李昌佳 彭超群 谭晓萍

陈灿华 胡业民 史海燕 刘 辉 谭 平

张 曦 周 颖 汪宜晔 易建国 唐立红

李海亮

总序

Preface

当今有色金属已成为决定一个国家经济、科学技术、国防建设等发展的重要物质基础,是提升国家综合实力和保障国家安全的关键性战略资源。作为有色金属生产第一大国,我国在有色金属研究领域,特别是在复杂低品位有色金属资源的开发与利用上取得了长足进展。

我国有色金属工业近 30 年来发展迅速,产量连年来居世界首位,有色金属科技在国民经济建设和现代化国防建设中发挥着越来越重要的作用。与此同时,有色金属资源短缺与国民经济发展需求之间的矛盾也日益突出,对国外资源的依赖程度逐年增加,严重影响我国国民经济的健康发展。

随着经济的发展,已探明的优质矿产资源接近枯竭,不仅使我国面临有色金属材料总量供应严重短缺的危机,而且因为“难探、难采、难选、难冶”的复杂低品位矿石资源或二次资源逐步成为主体原料后,对传统的地质、采矿、选矿、冶金、材料、加工、环境等科学技术提出了巨大挑战。资源的低质化将会使我国有色金属工业及相关产业面临生存竞争的危机。我国有色金属工业的发展迫切需要适应我国资源特点的新理论、新技术。系统完整、水平领先和相互融合的有色金属科技图书的出版,对于提高我国有色金属工业的自主创新能力,促进高效、低耗、无污染、综合利用有色金属资源的新理论与新技术的应用,确保我国有色金属产业的可持续发展,具有重大的推动作用。

作为国家出版基金资助的国家重大出版项目,“有色金属理论与技术前沿丛书”计划出版 100 种图书,涵盖材料、冶金、矿业、地学和机电等学科。丛书的作者荟萃了有色金属研究领域的院士、国家重大科研计划项目的首席科学家、长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、全国优秀博士论文奖获得者、国家重大人才计划入选者、有色金属大型研究院所及骨干企

业的顶尖专家。

国家出版基金由国家设立，用于鼓励和支持优秀公益性出版项目，代表我国学术出版的最高水平。“有色金属理论与技术前沿丛书”瞄准有色金属研究发展前沿，把握国内外有色金属学科的最新动态，全面、及时、准确地反映有色金属科学与工程技术方面的新理论、新技术和新应用，发掘与采集极富价值的研究成果，具有很高的学术价值。

中南大学出版社长期倾力服务有色金属的图书出版，在“有色金属理论与技术前沿丛书”的策划与出版过程中做了大量极富成效的工作，大力推动了我国有色金属行业优秀科技著作的出版，对高等院校、研究院所及大中型企业的有色金属学科人才培养具有直接而重大的促进作用。

王淀佐

2010年12月

前言

Foreword

斑岩型矿床是一类具有重大经济价值、也存在较大研究难度的矿床。非典型的斑岩矿床的矿化特征和形成机制尤其复杂。计算模拟有助于增进对这类矿床复杂空间结构和成矿动力学过程的理解。

本书选择与斑岩有关的大王顶金矿和车户沟钼铜矿为研究对象,在地质研究的基础上,通过形态模拟研究了成矿斑岩体的复杂空间形态;结合分形计算和属性模拟识别了不同矿化区,查明了成矿元素的空间富集规律;通过动力学数值模拟和时间序列的 R/S 分析揭示隐藏在复杂时空表象下的非线性成矿机制。取得了以下5个方面的主要成果:

(1)为了尽可能地克服现有模拟方法的局限,最大限度地发挥各种模拟方法的优势,本书进行了以下几方面的创新性尝试并取得了满意的效果:①发展了一种“基于多级约束的多源数据融合法”的形态模拟方法,可以有效地集成多源数据用于构建复杂的地质形态模型;②应用分形方法定量分析空间结构模拟和动力学过程模拟,从而将成矿系统时-空两方面的模拟结合起来分析讨论;③将 R/S 分析应用于研究动力学模拟的时序过程,挖掘了其中蕴含的非线性演化信息。

(2)三维形态模型显示了大王顶斑岩体呈现不规则的棱柱状,结合岩体的边界特征,推断岩体是在引张的构造环境下,沿着两组断裂的交叉部位被动侵位的,岩体侵位过程中,又追踪了岩层间的滑脱空间,从而造成了岩体复杂的空间形态。

(3)通过分形模型和成矿元素浓度场模型揭示了金元素主要富集分布在大王顶岩体上接触带北侧,动力学数值模拟的结果表明力-热-流耦合动力学过程产生的强扩容变形直接制约了金元素在空间上的富集分布,而最强烈的扩容变形正好发生在岩体上接触带北侧。产生这种制约关系的动力学原因在于扩容和随之而

来的流体减压有利于成矿流体汇聚和矿石沉淀。

(4)通过车户沟矿床的空间结构模拟揭示了钼铜矿化与花岗岩斑岩和角砾岩的密切关系,矿化角砾岩主要分布在斑岩体的西南,高品位矿石聚集分布在斑岩-角砾岩台阶状接触带产状平缓的部位。动力学模拟的结果表明强扩容变形是制约本矿床角砾岩化和钼铜矿化不均匀的关键因素,这种扩容变形的本质是流体超压引发的水压致裂。

(5)综合两个矿床计算模拟的研究成果,揭示了不同构造环境对斑岩成矿的制约作用:①引张和挤压应力场会引发不同的成矿动力学过程。在引张应力作用下,张性破裂会很快出现,引起扩容和流体减压;在挤压应力的作用下,岩石首先发生缩容,引起孔隙度减小从而不断提升流体压力,这种流体超压累积到一定程度就会引发水压致裂,造成强烈扩容和流体迅速减压。②在不同的成矿驱动力作用下成矿系统表现出不同的非线性时序行为特征。当成矿驱动力主要为引张应力时,时序状态会很快进入有利成矿-迟滞成矿的非稳定性持续循环过程,这种过程可以在一个成矿阶段内多次上演,并在正相关的持久性的影响下递进叠加导致成矿;当成矿驱动力主要为挤压诱发的流体超压时,迟滞时序状态最早出现并一直持续,直至驱动力累积到一个临界点后爆炸性地释放,随后进入有利时序状态并快速向成矿递进演化,这个过程在一个成矿阶段内不会循环出现,因为这种时序演化的长度小于一个自然序列的循环演化长度。

本书研究工作获得国家自然科学基金项目“浅成岩体接触带耦合多相系统动力学计算模拟及其成矿作用分析”(编号40772195)、“浅成岩体热液成矿系统流体超压和泄压及其动力学计算模拟”(编号41240017)和“岩体引发流体压力时空变化及其成矿响应的计算模拟”(编号41372338)以及中国冶金地质总局中南局、铜陵有色金属集团股份有限公司委托的多个研究项目的资助,在此一并致谢。

作者

2016.3.10

目录

Contents

1 绪论	(1)
1.1 研究意义	(1)
1.2 研究进展综述	(2)
1.2.1 斑岩型矿床复杂性的研究进展	(2)
1.2.2 地学计算模拟的研究进展	(3)
1.3 研究思路、研究方法与技术路线	(6)
1.4 主要研究成果与创新点	(7)
2 计算模拟的基本原理和方法	(9)
2.1 Delaunay 三角网及剖分算法	(9)
2.2 克立格(Kriging)插值	(12)
2.2.1 克立格法的理论基础	(12)
2.2.2 克立格法的数学表述	(13)
2.3 分形计算与分析	(15)
2.3.1 分形的定义	(15)
2.3.2 分形维数及其计算方法	(17)
2.3.3 多重分形	(18)
2.3.4 R/S 分析法	(19)
2.4 成矿动力学数值模拟的基础理论	(21)
2.4.1 数值模拟和 FLAC3D 简介	(21)
2.4.2 FLAC3D 求解动力学过程的本构方程和状态方程	(22)

3	大王顶矿床的区域地质背景及矿床地质特征	(25)
3.1	区域地质背景	(25)
3.1.1	大地构造位置及地壳演化	(25)
3.1.2	区域地层与沉积建造	(25)
3.1.3	区域岩浆岩与热演化	(29)
3.1.4	区域构造	(30)
3.2	矿床地质特征	(32)
3.2.1	矿床构造要素及其相互关系	(33)
3.2.2	矿体的几何形态及产状特征	(36)
4	大王顶矿床空间结构的计算模拟	(41)
4.1	大王顶岩体的三维形态模拟	(41)
4.1.1	原始勘查数据的处理	(41)
4.1.2	基于多源数据的形态模拟方法	(44)
4.1.3	大王顶岩体三维形态的空间变化规律	(48)
4.1.4	控制岩体形态变化的地质因素	(52)
4.2	大王顶矿床 Au 元素分布的分形分析	(56)
4.2.1	Au 元素的 C - V 模型及矿化分区	(56)
4.2.2	Au 元素分布的多重分形	(61)
5	大王顶矿床的成矿动力学模拟	(67)
5.1	成矿动力学模拟的前处理	(67)
5.2	模拟结果与分析	(69)
5.3	成矿过程的 R/S 分析	(74)
6	车户沟矿床的计算模拟	(79)
6.1	区域地质背景及矿床地质特征	(79)
6.1.1	区域地质背景	(79)

6.1.2 矿床地质特征	(80)
6.2 岩性单元的三维形态模拟	(85)
6.2.1 基于钻孔数据的平行剖面法	(85)
6.2.2 斑岩体和角砾岩的空间形态特征	(86)
6.3 成矿元素空间分布的分形特征	(88)
6.3.1 成矿元素的 C - V 模型及矿化分区	(88)
6.3.2 成矿元素空间分布的多重分形特征	(93)
6.4 成矿动力学模拟	(96)
6.4.1 模型参数和模拟条件	(96)
6.4.2 模拟结果及其对成矿的指示意义	(97)
6.4.3 成矿过程的 R/S 分析	(101)
7 讨论与结论	(104)
附录	(106)
附录一 多重分形分析	(106)
附录二 R/S 分析	(119)
参考文献	(121)

1 绪论

1.1 研究意义

斑岩型矿床已经成为金属铜、钼最主要的来源和金的重要来源,对斑岩型矿床的研究一直备受关注。以岩浆弧斑岩铜矿成矿模型为核心的经典成矿理论以及近年来对大陆环境斑岩矿床的研究促进了我们对斑岩型矿床的认识(Lowell and Guilbert, 1970; Sillitoe, 1972; Tosdal and Richards, 2001; Richards, 2003; Cooke et al., 2005; Seedorff et al., 2005; 陈衍景, 2006; 侯增谦和杨志明, 2009)。然而国内还发现一些与斑岩有关的矿床,其矿化特征和形成机制都不同于典型的斑岩型矿床。这类矿床无法用已有的斑岩成矿模型来解释,也无法沿用斑岩型矿床那套成熟的研究思路和方法,对这类矿床复杂性的认识不足制约了矿床的勘查工作。

矿床研究,特别是热液矿床的研究一直是地质研究中的一个热点,矿床的复杂性是阻碍矿床研究的一个主要难题。从本质上来说,矿床的复杂性是由成矿系统的多过程非线性耦合动力学机制造成的,对这种复杂性的了解有赖于采用有效的方法对矿床的复杂特征进行准确的描述,并对其内在的耦合动力学系统进行深入剖析。

计算模拟是研究复杂地质系统的有效手段之一,这是因为:①地质现象和地质过程往往受到大量的随机作用、时间变异和/或空间偏移的影响,要透过这些表象的遮蔽探究它们的实质,计算模拟是一种行之有效的方法(Thiergaärtner, 2006);②地质系统往往牵涉到巨大的时间和空间尺度,极端的温度、压力等物理条件以及海量的物质种类和成分,无法简单地通过理论推演或实验来进行再现和研究,计算模拟已成为继理论研究和实验研究之后的第三种研究手段;③成矿系统非线性的空间结构和时序行为特征可以借助计算模拟予以揭示和描述。

目前,成矿系统的动力学数值模拟已经成为矿床研究的热点(邓军等, 1999; Zhao et al., 2009; Ingebritsen and Appold, 2012; Liu et al., 2012),这些研究促进了对各类矿床形成机制的理解;与此同时,分形计算和分析作为研究非线性系统的重要工具也在矿床研究领域得到了广泛的应用(Mandelbrot, 1989; 於崇文, 2003; 成秋明, 2006, 2007; Zuo et al., 2009a; Arias et al., 2011);但这两方面的研究却很少交集(Sun and Liu, 2014)。

广西昭平大王顶金矿位于大瑶山成矿带的中部,内蒙赤峰车户沟钼铜矿位于

西拉沐伦成矿带的南缘,这两个矿床的形成都与花岗斑岩密切相关,但其矿化特征又明显不同于典型的斑岩型矿床,目前已经开展的大量勘查和研究工作未能透彻地解析矿床的复杂性。本书应用包括形态模拟、属性模拟、分形计算分析、动力学数值模拟在内的多种计算模拟方法对这两个矿床各方面的复杂性进行研究。这种研究不仅有助于认识这两个矿床的成矿机制和控矿因素,从而促进找矿勘查和开发;而且通过对比研究形成于不同构造环境中的这两个矿床的成矿动力学机制,可以增进对这类与斑岩有关矿床的形成机制的理解;同时,本书结合动力学数值模拟和分形理论方法用于研究成矿系统非线性时空演化过程的尝试也可以为计算模拟的研究提供一种新的思路。

1.2 研究进展综述

1.2.1 斑岩型矿床复杂性的研究进展

斑岩型矿床的复杂性常表现在以下几个方面:①多样的成矿构造环境;②复杂的矿化特征;③多过程耦合的成岩成矿机制。

斑岩型矿床可产于不同的构造环境下。Sillitoe (1972)提出了斑岩铜矿形成于板块俯冲背景的板块构造模型,将斑岩型矿床的成矿构造环境定位于岩浆弧环境(包括岛弧和陆缘弧);斑岩型矿床常产于汇聚板块边缘这一现象让地质学者意识到挤压构造环境对形成斑岩型矿床的重要性(Sillitoe, 1998; Gow and Walshe, 2005; Masterman, 2005)。然而近年来的研究表明,斑岩型矿床也可以产于大陆碰撞造山带,如玉龙和冈底斯成矿带(芮宗瑶等, 2003; 侯增谦等, 2007; 陈建平, 2009; 侯增谦和杨志明, 2009),甚至陆内环境,如江西德兴(朱训等, 1983; 华仁民等, 2000); Richards 等(2001)认为有利于形成斑岩型矿床的构造环境并不是单纯的俯冲和挤压,还应包括:①上地壳处于长期挤压状态后的应力松弛期;②成矿域内存在早期深大断裂,且这些断裂在应力松弛期活化张开。侯增谦等(2007)也指出,除了挤压构造背景外,走滑断层和伸展构造也对斑岩型矿床的形成起了重要的控制作用,并总结了斑岩型矿床产出的4类大陆环境:晚碰撞走滑环境、后碰撞伸展环境、后造山伸展环境和非造山崩塌环境。

斑岩型矿床具有特征性的蚀变分带,最经典的蚀变分带模式为适用于钙碱性中酸性斑岩系列的Lowell-Guilbert模式(Lowell and Guilbert, 1970),和适用于中性岩系列的Hollister模式(Hollister, 1974)。多数地质学者认为斑岩型矿床的矿化和蚀变分带在空间和时间上具有一致性,矿化基本富集于特定的蚀变带中(Gustafson and Hunt, 1975; 芮宗瑶, 1984; 孟良义, 1992; 孟祥金等, 2004; 杨志明等, 2008; Sillitoe, 2010)。但是,斑岩型矿床的矿化特征除了与斑岩自身的特征有关外,还在一定程度上受控于斑岩侵位的围岩岩相环境,再加之斑岩型矿化常被后期的浅成低温热液矿化叠加,因此会造成比典型蚀变-矿化分带复杂得多

的矿化分布模式(侯增谦, 2004)。

在基本了解了斑岩型矿床的典型特征, 并逐步建立和完善了一般性的成矿-勘查模式后, 斑岩型矿床的研究重心开始转向对成岩成矿机制的理解上, 如岩浆的性质与起源、成矿流体的来源和演化、金属的来源与迁移、矿物沉淀机制等方面(Ulrich et al., 1999, 2001; 张德会等, 2001; Harris et al., 2003; Richards, 2003; 侯增谦, 2004; 芮宗瑶等, 2004; Candela et al., 2005; Heinrich, 2005; 侯增谦等, 2005; 姜耀辉等, 2006; 陈衍景和李诺, 2009)。随着研究程度的加深, 越来越多的学者认识到斑岩型矿床的各种地质过程之间存在耦合动力学机制, 需要将斑岩成矿系统看作一个完整的动力学系统来进行研究(高合明, 1994; 於崇文, 1995, 2003; Ingebritsen et al., 2010)。Norton 等西方学者首先采用数值模拟的方法研究了斑岩成矿系统中热传递、流体运移和质量传输等过程, 并依此探讨了斑岩铜矿的成因(Cathles, 1977; Norton and Knight, 1977; Knapp and Norton, 1981; Norton, 1982; Johnson and Norton, 1985); 我国的学者也以国内的斑岩矿床为研究对象进行了相关的模拟研究, 讨论了成矿过程中力场、温度场、流体场的演化特征(高合明等, 1994; 郭国章等, 1994; 任启江等, 1994)。近年来, 计算机性能的提升和计算科学的发展促进了对斑岩成矿多场多过程耦合机制的理解(Gow et al., 2002; Guillou - Frottier and Burov, 2003; Li et al., 2005; Eldursi et al., 2009; Fu et al., 2010; Sun and Liu, 2014), 其中最突出的成果是 Weis 等(2012)和 Ingebritsen(2012)在 *Science* 发表的两篇文章, 通过数值模拟的结果揭示了岩浆引起的流体压力和温度及岩石渗透率变化的自稳定过程及其对斑岩成矿的制约。

1.2.2 地学计算模拟的研究进展

地学领域的计算模拟在短短几十年的发展历史中有两个关键性的进程: ①加拿大地质学者 Houlding (1994)提出了三维地质模拟(3D Geosciences Modeling)的概念, 从此地质模拟才能在真正意义上实现在虚拟平台上重建真实三维空间体系中的地质要素; ②进入 21 世纪以来, 数值模拟的方法开始广泛地应用于对地质系统时间演化的研究, 成为解释具有巨大时间跨度和不可再现性的地质过程的有力工具。

地学领域特别是涉及矿床研究方面的计算模拟的研究现状和进展可概括为如下 4 个方面。

(1)空间数据模型是地质模拟的基础。地质模拟从早期简单的概念模拟发展到目前复杂的类型指向型和过程指向型模拟, 对空间数据模型表达能力的要求也相应提高。目前已有几十种数据模型可用于地质模拟, 吴立新等(2003)将之归为面元模型、体元模型和混合模型三大类(表 1-1), 这些模型基本能满足各类计算模拟的需求, 而一些具有更强表达能力、对具体问题适用性更强的数据模型还会继续涌现和发展(吴立新和史文中, 2005; 武强等, 2005; 关文革, 2006; 朱良峰