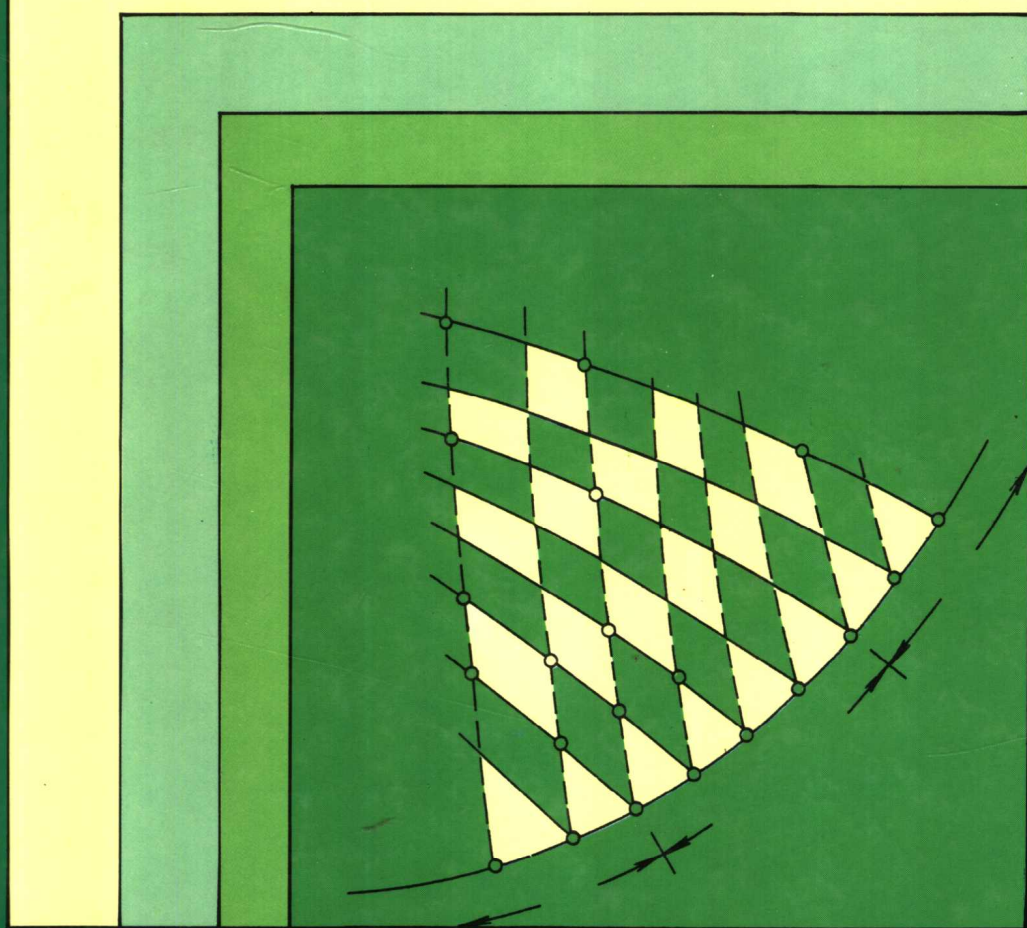


地质矿产部“八五”基础地质研究项目基金资助

成矿作用 动力学

於崇文 岑 况 鲍征宇 张德会 何文武 唐仲华 著



地质出版社

内 容 简 介

矿床成因的基本问题,归根结底是成矿作用的动力学问题。研究表明,对矿床或成矿区带进行成矿作用动力学研究可以揭示成矿作用的本质,即成矿作用的驱动力、进行的速率和机制及其时间演化与空间展布(成矿作用及其时-空结构),从而使矿床成因和成矿规律研究从静态上升到动态,从定性走向定量。

本书首次系统地提出了“成矿作用动力学的理论体系和方法论”,通过对安徽铜陵层控矽卡岩型铜矿床、江西德兴斑岩型铜矿床(田)、江西银山火山-次火山型多金属矿床的成矿作用动力学研究,揭示了成矿作用的驱动力与动力学机制,并提出了新的热液成矿分带理论和地球化学场时-空结构的自组织临界性等新理论观点;同时,设计与完成了对成矿作用动力学过程进行计算机模拟的软件系统,从而开拓了矿床学的重要学术方向与领域,深化了矿床成因理论。

本书适用于进行地质成矿工作的地质人员、研究人员和高校的高年级学生与研究生。

图书在版编目(CIP)数据

成矿作用动力学/於崇文等著.-北京:地质出版社,1998.6
ISBN 7-116-02371-2

I. 成… II. 於… III. 成矿作用-动力学 N.P611

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 05551 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:周继荣

责任校对:田建茹

*

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092 1/16 印张:15.25 字数:350000

1998 年 6 月北京第一版·1998 年 6 月北京第一次印刷

印数:1—500 册 定价:48.00 元

ISBN 7-116-02371-2

P·1780

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

前言

本书是地质矿产部“八五”基础地质研究项目“岩浆期后成矿作用动力学”的研究成果。项目编号为 8502216, 项目起迄日期是 1992 年 8 月至 1995 年 12 月。本项目以安徽铜陵层控矽卡岩型铜矿床、江西德兴斑岩铜矿田及其外围的银山火山-次火山型多金属矿床为重点, 根据本书第一作者所提出的“成矿作用动力学的理论体系和方法论”, 应用流体动力学、化学动力学、物理化学流体动力学和构造物理流体动力学等动力学理论及现代非线性科学原理与相应的数学模型的理论分析与计算机模拟实验技术, 系统而深入地研究了岩浆期后成矿作用的动力学过程及成矿系统的时-空结构。本书最后在总结研究成果的基础上, 提出了“成矿系统的复杂性与自组织临界性”, 作为“九五”期间成矿作用动力学研究的主攻方向。

本书介绍的主要研究成果有:

一、系统地提出了“成矿作用动力学”的理论体系和方法论, 为开拓矿床学的新领域及深化矿床成因理论创造了必要条件

长期以来, 国内外传统的矿床成因研究大多只从地质学、矿床学和物理化学方面进行探讨, 缺乏对于成矿作用动力学这一矿床成因的核心问题的深入研究。

矿床成因的基本问题, 归根结底是成矿作用的动力学问题。成矿作用动力学是地球化学动力学中的一个重要分支领域, 又是矿床成因理论中的一个新的学术方向, 但至今还是一个亟待开拓的空白领域。本次研究系统地提出了“成矿作用动力学”的理论体系和方法论, 为开拓矿床学的新领域和深化矿床成因理论创造了必要条件。成矿作用动力学研究在广义力(温度梯度、浓度梯度、速度梯度和化学反应亲和力等)的驱动下成矿作用进行的速率、机制和全过程。对矿床或成矿区带进行成矿作用动力学研究, 可揭示成矿作用的本质, 即成矿作用的驱动力、进行的速率和机制及其时间演化与空间展布(成矿作用及其时-空结构), 从而使矿床成因和成矿规律研究从静态上升到动态, 从定性走向定量, 对传统的成矿理论将有新的突破。同时, 成矿理论的深化又对成矿预测和矿产资源的开发具有重要的指导意义。

二、对于三种不同类型岩浆期后矿床的成矿作用进行了动力学研究, 揭示了成矿作用的驱动力及矿床形成的动力学机制, 深化了矿床成因理论

1. 安徽铜陵层控矽卡岩型铜矿床

应用多孔介质中热、质输运与流体-岩石相互作用耦合过程动力学理论, 研究了该矿床的成矿作用动力学机制。

研究的思路是: 在对成矿系统作局域平衡的假设下, 以可渗透介质中反应流动过程的准稳态近似为前提, 运用流动-反应的移动边界物理模型来模拟和阐明矿床形成的动力学机

制。所建立的动力学理论模型综合考虑了非等温条件下的流体流动和多组分、多相之间化学反应的耦合,反映了输运-反应耦合过程动力学研究的最新进展。

研究工作采用了理论分析和计算机模拟相结合的方法,研究了铜陵地区天马山和铜官山两个矿床的成矿作用全过程——中酸性岩浆侵入后如何形成温度场和流体的流速场,热致流体流经多孔岩石时成岩成矿物质如何活化和混合,曾经发生过何种化学反应以及如何输运,然后再在何时何地富集沉淀成矿。

1. 理论研究

理论研究指出:

(1) 成矿流体的盐度梯度和流速均可促进岩浆水与地层水的混合和反应,透水层是二者发生强烈混合输运-反应与成矿作用的有利场所。

(2) 在顺层方向上发生等温输运反应时,成矿流体与岩石接触界面处形成的移动输运反应前锋顺透水层从上游向下游缓慢推进,形成了与地层整合的层状砂卡岩与层状矿体。

(3) 在穿层方向上发生穿越等温线的梯度输运反应,结果使矿物成分从镁砂卡岩向硫化物矿体发生渐变过渡。

2. 计算机模拟

计算机模拟表明:

(1) 天马山矿床 图 2—16 表示岩浆入侵、冷凝后形成一个以岩体为中心的温度场。图 2—17 表示岩体冷凝后热液的流速、流向和流量。热液流动中心位于砂岩和白云岩区。当热液从砂岩流经白云岩而达到其与石灰岩的界面时即行折返,并顺层向岩体流动。在界面处形成反应前锋,并发生矿质沉淀。

图 2—18 表示从五通组砂岩和黄龙船山组石灰岩中分别选定的起点出发,经过设定的时间(3 万年),热液在空间上的流动轨迹。当热液从砂岩中的起点出发,则在 3 万年内热液将在白云岩-岩体-砂岩之间作两次循环流动。如经多次循环往复,则最终将导致砂岩中的黄铁矿和石英二长闪长岩中的微量铜、金、银等金属元素活化迁移,并在白云岩层内或其界面上沉淀而富集成矿。反之,若热液从石灰岩中的起点出发,则由于热液流速非常缓慢,在 3 万年内仅流动了 400 余米,仍未流出灰岩。

图 2—23 表示热液流动、扩散和流体-岩石相互作用耦合过程的结果使砂岩中的黄铁矿发生溶解,包含溶质的热液流至砂岩与灰岩的界面处,与后者发生相互作用,形成反应前锋,在界面处生成溶解裂隙,并发生黄铁矿再沉淀。值得注意的是,经过 200 年的时间,反应前锋向下游推进,与之相应地,界面处的溶解裂隙扩大,而所沉淀的黄铁矿也随之展宽,并出现多个峰值。

(2) 铜官山矿床 图 2—20 表示石英二长闪长岩岩浆侵入到中上石炭统黄龙组、船山组白云岩与灰岩之后所形成的温度场。温度梯度方向垂直于接触界面。

图 2—21 表示热液从上部石英二长闪长岩岩体向下流经上泥盆统五通组砂岩区,汇集而流到白云岩层或白云岩与石英二长闪长岩的接触界面处,部分热液可穿越白云岩到达岩体,作短距离流动后,再次流入白云岩和砂岩。如此多次循环往复,经过前述的输运-反应耦合过程,结果在接触带上形成顺层分布的矿体。

II. 江西德兴斑岩铜矿田

应用输运-反应耦合过程和流体动力分形弥散两种动力学理论研究了铜厂矿床的成矿

作用动力学机制和过程。

1. 流体输运与流体-岩石相互作用耦合过程动力学研究

国外的斑岩型铜矿床多具岩体中心式的矿化-蚀变分带，而德兴斑岩铜矿田则别具一格，具有以接触界为中心的矿化-蚀变分带。本次研究揭示了这种国内外独特的接触带中心式的矿化-蚀变分带形成的动力学机制。

(1) 通过对德兴斑岩铜矿田的详细裂隙测量和统计分析，证实了矿田内的含矿裂隙具有以花岗闪长斑岩岩体为中心、沿接触带呈放射状和同心圆状分布的规律，其构造位向与区域构造体系截然不同，认为产生断裂的能量来源于岩体的侵位，而其应力则来自与侵入活动有关的热应力与岩浆及热液的驱动力，因此可以称之为“热致与流体驱动的断裂构造”。这是形成接触带中心式的矿化-蚀变分带型式的构造物理-流体动力学原因。

(2) 通过对以接触带为中心的面型蚀变和受裂隙控制的线性蚀变所进行的系统的时-空动力学模拟表明，接触带中心式的矿化-蚀变分带型式是成矿流体自接触带向内、外两侧的输运过程中（流动为主）和流体自裂隙向两侧的输运过程中（扩散为主），与岩石发生交代反应在时-空中演变的产物。

2. 流体动力分形弥散动力学理论研究

应用分形弥散理论研究发现，江西德兴斑岩铜矿田内地质多孔介质的非均质性表现为矿床多孔岩、矿石和构造裂隙具有下列三方面自相似性的分形特征。

(1) 浸染矿化边界的弥散状自相似性 矿床内的铜矿化以细脉浸染为特征。矿化强弱呈过渡变化，矿体与围岩之间无严格的突变界线，矿体范围随圈定矿体的工业指标改变而改变。浸染状矿化的边界呈参差不齐、极不规则的弥散状。这一特点大自整个矿田，历经矿床、矿体，小至矿石甚至含矿微细网脉，一脉相承，彼此相似，具有典型的分形特征。

(2) 热液蚀变分带的时-空分布和作用的自相似性 德兴斑岩铜矿田内与成矿作用关系最密切的主期热液蚀变以岩体接触带为中心，向内、外两侧呈现对称分带，呈大面积分布，即所谓面型蚀变分带。空间上自远离接触带向接触带趋近，依次出现以伊利石化为标志的弱蚀变带，以水白云母化为标志的中蚀变带和以石英、绢云母化为标志的强蚀变带。

德兴矿田内，除面型蚀变分带外，在不同脉幅的矿脉侧旁尚有线性蚀变带出现。从脉壁向外，依次出现石英-绢云母化带、水白云母化带和伊利石化带。线性蚀变分带与面型蚀变分带完全一致，而且矿脉脉幅自数十厘米、数厘米至 1 mm 以下，线性蚀变分带全为一种模式。

除蚀变分带时-空分布上的自相似外，其作用过程亦具自相似性，表现在蚀变过程中带入和带出的化学元素基本相同。

(3) 热致与流体驱动裂隙系统的统计学自相似性 德兴铜矿田内围绕花岗闪长斑岩岩体接触带的放射状与同心圆状热致与流体驱动断裂裂隙系统控制着蚀变围岩与矿体的分布与定位。在矿田整体与其各个不同大小的局部区域之间，这种特定走向的断裂裂隙系统存在着统计学上的自相似性。

应用分形弥散理论对德兴铜矿田的成矿与蚀变作用作进一步的深入研究表明：热液成矿与蚀变作用具有一种差异平流所导致的流体动力分形弥散机制，而其实质则是一种平流-分形随机游动。这一研究成果对江西德兴斑岩铜矿田的矿床成因提出了新认识，并且可以用来解释斑岩型铜、钼、铅、锌矿床及花岗岩型钨、锡、铍和稀土等矿床中类似的成矿作

用动力学机制。

Ⅲ. 江西银山火山-次火山型多金属矿床

银山多金属矿床为火山-次火山型岩浆期后中低温热液矿床,属于斑岩矿床与浅成热液贵金属矿床之间的过渡型矿床。本次工作对该矿床的成矿作用进行了地质学、物理化学和成矿作用动力学相结合的综合研究。

1. 地质学研究

地质学研究指出:

(1) 银山多金属矿床所处的独特大地构造位置具备形成大型矿床的地质背景(处于赣东北深大断裂与东安河深断裂之间)、矿源(双层结构的地层,多来源矿质)、成矿动力(构造、岩浆频繁活动,深部有隐伏岩体,浅部有火山-次火山岩,背斜轴部发育剪切带等)及矿质分异富集条件(多期次、长期的岩浆热液活动)。

(2) 成矿演化具有多期多阶段性。矿床具有发育良好的成矿分带。分带结构具有多中心、不对称、叠加和定向的特征,属顺向脉动分带。成矿中心由北东向南西转移。

(3) 火山岩与次火山岩均为深部隐伏岩体的衍生物。

2. 物理化学研究

物理化学研究指出:

(1) 在查明特定条件下成矿元素的配合物形式时发现,元素配合物的溶解度是引起矿质有序沉淀与分带的重要原因。

(2) 由于成矿热液中配合体(及中心离子)的浓度有限,因而仅靠一次热液活动难以形成大规模的矿质富集。成矿流体多期次、多阶段上升、循环、沉淀和富集可能是形成银山大型多金属矿床的重要原因。

3. 成矿作用动力学研究

银山矿床的成岩、成矿作用(温度场与流速场时-空演化)的动力学研究结果表明:

(1) 仅由一条或数条岩脉,不足以提供形成银山矿床所需的大量热能与矿质。

(2) 银山矿床深部可能有隐伏岩体存在,它为维持长时间和大范围的温度场、热液流速场以及获得成矿所需的充足能源与矿源提供了保障。

(3) 隐伏岩体顶面向南西缓倾,是银山矿床的成矿作用由NE向SW“多中心”转移的主导因素,是成矿分带不对称性、重叠性和定向性的主要原因。

(4) 浅部次火山岩脉与深部的岩浆源(隐伏岩体)相联系,侵位温度较高,有利于形成若干次一级的热源和热液对流中心,导致成矿分带的多中心性。

三、提出了一种新的热液成矿分带理论,对热液成矿分带问题的性质、热液成矿分带的本质以及热液成矿分带的结构特征与形成机制提出了新认识,并发展了Д. С. Коржинский的渗滤交代分带理论

1. 热液成矿分带问题的性质

(1) 热液成矿分带是成矿流体在多孔岩石中流动时与岩石之间发生化学作用的结果,因此是一种“反应-流动问题”。

(2) 热液成矿分带基本上属于渗滤交代分带性质,它是溶解-沉淀波(一种化学波)在可渗透介质中形成和传播的结果。

(3) 解决热液成矿分带问题的关键在于揭示分带的结构特征及其形成机制。

2. 热液成矿分带的结构特征及其形成机制

本次研究应用物理化学流体动力学中渗滤与溶解-沉淀反应耦合过程理论研究溶解-沉淀波的结构特征,并进一步应用多组分耦合系统动力学理论中的相干原理揭示其形成的动力学机制。研究结果揭示了如下的热液成矿分带的结构特征与形成机制:

(1) 形成截然的分带边界 在流体与岩石的接触界面两侧(上、下游),流体组分浓度之间与固相组分浓度之间出现不连续。接触界面处形成截然的交代前锋,亦即截然的分带边界。

(2) 从下游到上游,交代前锋的移动速度递减,并以常速向下游推进。

(3) 形成定常成分的分带序列 带的边界将各带分隔开来。各带构成一个分带序列,并以不同的定常成分,即不同的矿物组合和元素组合相区别。

(4) 各个交代分带同时发生和发展 各个分带同时发生,并借各个交代前锋以不同速度的移动而同时按相应比例发展和扩大,而其成分和相对宽度保持不变。上、下游前锋的移动速度虽有不同,但其结果只是导致各个分带距离溶液入口处有相对远近,而并不造成它们形成时间上的相对早晚。

(5) 多组分成矿系统自发产生不同矿物组合和元素组合的时-空分离 从下游至上游方向交代前锋的移动速度递减,并以常速向下游推进,构成了交代分带的时-空构架,物种速度(分子、离子速度)落后于浓度速度(波速)提供了分带序列的实体,而同一交代前锋内所有物种的浓度在同一方向上彼此相伴、以同速行进(即结伴同行)则导致了同一交代带内的成分守恒和特定的矿物和元素组合。

以上研究成果验证并发展了 Д. С. Коржинский 的渗滤交代分带理论,将其从定性的平衡热力学基础提高到定量的动力学水平,揭示了成矿分带的结构特征及其形成的动力学机制。

四、用自组织理论研究地球化学场的时-空结构,揭示其自组织临界性,表明地球化学过程在动力学上是一种自组织临界过程

(1) 将地球化学场定义为化学元素含量在空间区域上的分布,而含量的区域分布又随时间而演化;也就是说,地球化学场的场量(元素含量)是时间和空间坐标的函数。地球化学场的时-空结构具有结构性与随机性的双重属性,前者指其有序的一面,而后者则指其无序的一面。然而随机性往往又叠加在结构性之上,从而使其时-空结构介于有序与无序之间的临界状态,具有高度的复杂性。

(2) 应用自组织理论研究地球化学场的时-空结构,表明地球化学场的场量之空间分布和时间演化均具无标度性即分形结构(自相似性)。关于场量的时间演化也可以说具有 $1/f$ 谱分布特征,即频率与对应的谱密度具有幂律关系。

(3) 这一结果揭示了地球化学场的时-空结构具有自组织临界性,而导致此种时-空结构的地球化学过程在动力学上是一种自组织临界过程。

上述自组织临界性的实质是地球化学系统处于一种临界状态。在这种状态下,众多子系统(原子、离子、分子、矿物相等)之间强烈相互耦合,亦即它们之间存在非线性的相互作用,致使局部的微小扰动将以多米诺效应的方式传播并放大而遍及整个系统,从而小

事件触发大事件，而且大、小事件之间彼此相似，即具有“自相似性”。

(4) 分析了导致地球化学场自组织临界性的动力学机制，认为是导致元素迁移富集的“环境因子”的非线性正反馈机制促成地球化学场的自组织，并提出了一个相应的理论模型(耦合映象格子模型)。

(5) 地球化学场的时-空分形结构揭示了成矿物质的时-空富集机制，从而为应用于成矿预测提供了一种新的视角和前景。

五、从理论上分析了地球化学平衡原理的热力学基础，发展了多相多组分平衡的计算方法

(1) 研究证明，不仅可以从物种自由能数据计算得到平衡常数，而且可以从平衡常数得到物种自由能数据。

(2) 给出了高温高压下溶液中物种的表观自由能数据的预测原理和方法以及溶质活度系数的计算方法。

(3) 计算了安徽铜陵地区冬瓜山矿床和新桥矿床内黄铜矿、石英与灰岩共存条件下成矿热液中组分的溶解度。

(4) 提出了这两个矿床岩浆期后热液流动-反应成矿作用的模式。

六、设计并完成了流体热、质输运-反应动力学的一维和二维模拟软件系统

本软件在国内首次将热输运、热致流体流动、物质输运及多相多组分化学反应耦合的动力学分析编成系统软件，并首先在本次研究中应用于安徽铜陵地区层控矽卡岩型铜矿床和江西银山金、银、铜、铅、锌多金属矿床的成矿作用动力学研究。

本项研究成果推广应用的范围和前景有：

(1) 根据本成果所提出的“成矿作用动力学的理论体系和方法论”可以将成矿作用动力学的研究推广和扩大应用于岩浆期后矿床以外的其它成因类型矿床，诸如岩浆矿床、沉积矿床、变质矿床和层控矿床等，以期深化和革新传统的矿床成因理论，不断开拓和充实矿床学的这一新领域。

(2) 将地球化学动力学中的成矿作用动力学和壳幔相互作用动力学这两个分支领域相结合，深入系统地研究并揭示我国某些典型成矿区带的成矿规律，从而为区域和深部成矿远景预测提供动力学的定量的理论依据。

(3) 将上述两方面的研究相互结合将可逐步建立一种新的金属成矿理论——“成矿系统自组织”。

本项目主要研究人员有於崇文、岑况、鲍征宇、张德会、蒋耀淞、肖正域、唐仲华和何文武。於崇文为项目负责人。本书各章节撰写分工是：前言，於崇文；第一章，於崇文；第二章第一、二、四、五、六节，岑况；第三节，於崇文、蒋耀淞、肖正域；第三章第一、二节，何文武；第三节，於崇文；第四章，张德会；第五章，於崇文、蒋耀淞、肖正域；第六章，鲍征宇；第七章，唐仲华；结束语，於崇文。全书最后由於崇文统一审定，岑况协助整理。

目 录

前 言

第一章 成矿作用动力学的理论体系与方法论	1
1.1 成矿作用动力学理论体系	3
1.1.1 水-岩相互作用的化学动力学	3
1.1.2 流体动力学	6
1.1.3 物理化学流体动力学	8
1.1.4 构造物理流体动力学	12
1.1.5 流变-反应耦合过程动力学 (力学-化学耦合动力学)	14
1.1.6 非平衡系统的自组织	15
1.1.7 分形几何学与混沌动力学	16
1.1.8 自组织临界性和重正化群方法	17
1.2 成矿作用动力学的方法论	19
1.2.1 认识方法	19
1.2.2 研究方法	22
参考文献	24
第二章 层控矽卡岩型铜矿床的成矿作用动力学——以安徽铜楼层控矽卡岩型铜矿床为例	30
2.1 安徽铜楼层控矽卡岩型铜矿床的地质-地球化学特征	30
2.1.1 铜陵地区区域地质概况	30
2.1.2 矽卡岩型铜矿床的矿床类型	33
2.1.3 层控矽卡岩型铜矿床	34
2.1.4 层控型硫化物矿床成矿作用的地质-地球化学特征	39
2.1.5 成矿物质来源	45
2.2 热、质输运与流体-岩石相互作用耦合过程动力学理论	51
2.2.1 热传导和流体流动	52
2.2.2 多组分溶液相中的化学反应和平衡	53
2.2.3 流动-反应耦合过程偏微分方程组	54
2.3 铜楼层控矽卡岩型铜矿床成矿作用的动力学理论分析	55
2.3.1 岩浆水与地层水混合输运-反应	56
2.3.2 等温输运-反应	58
2.3.3 梯度输运-反应	60
2.4 不同岩石环境中矿物差异溶解度与成矿作用	62
2.4.1 砂岩环境中硫化物的化学行为	62
2.4.2 碳酸盐岩环境中硫化物的化学行为	63
2.5 铜陵地区天马山、铜官山矿床的热流和流体流动的动力学分析	64
2.5.1 热致流体流动的动力学参数	65

2.5.2 热传导及流体流动动力学模拟与结果讨论	67
2.6 铜陵硫化物矿床流体流动-化学反应耦合过程的动力学分析	71
参考文献	76
第三章 斑岩型铜矿床的成矿作用动力学——以江西德兴斑岩铜矿田为例	78
3.1 德兴铜厂斑岩铜矿床的成矿特征	78
3.1.1 成矿地质背景	78
3.1.2 围岩蚀变及其分带	80
3.1.3 矿化作用	85
3.1.4 控矿构造	86
3.1.5 成矿温度	90
3.2 德兴铜厂斑岩铜矿床热液成矿作用的输运-反应耦合过程动力学研究	92
3.2.1 系统的基本性质	92
3.2.2 数值模拟及其地质-地球化学意义	95
3.2.3 裂隙的演化	105
3.2.4 围岩蚀变形成机理	106
3.2.5 某些找矿标志	107
3.3 成矿作用的流体动力分形弥散机制	108
3.3.1 多孔介质中的流体动力弥散作用	108
3.3.2 分形弥散模型	108
3.3.3 矿床多孔岩石和构造裂隙的分形特征	110
3.3.4 成矿作用的流体动力分形弥散机制	113
参考文献	116
第四章 火山-次火山热液成矿作用动力学——以江西德兴银山多金属矿床为例	119
4.1 银山多金属矿床地质特征	119
4.1.1 区域地质	119
4.1.2 矿区地质	119
4.1.3 矿床地质	122
4.2 成矿分带研究	122
4.2.1 成矿作用的时间演化	122
4.2.2 原生成矿分带	124
4.2.3 成矿分带的时-空结构	129
4.2.4 小结	133
4.3 矿床成因研究	134
4.3.1 成矿物质来源	134
4.3.2 成矿物理化学条件	134
4.3.3 成矿演化的热力学研究	135
4.3.4 成矿分带地质因素讨论	136
4.3.5 关于矿床的成因	138
4.4 主要成矿元素溶解度(溶解量)研究	139
4.4.1 配合物稳定性与矿床分带	140

4.4.2 主要成矿元素溶解量的计算机模拟	143
4.4.3 配合物溶解度与矿床分带	151
4.4.4 小结	154
4.5 成矿温度场和热液流速场研究	155
4.5.1 多孔介质中热质迁移的数学模型	155
4.5.2 银山矿床温度-热液流速场数值模拟	158
4.5.3 小结	169
4.6 结语	169
参考文献	172
第五章 热液成矿分带的溶解-沉淀波结构	175
5.1 热液成矿分带问题的性质	175
5.2 Д. С. Коржинский 渗滤交代分带理论概述	176
5.3 渗滤与溶解-沉淀反应耦合过程理论和溶解-沉淀波结构特征	177
5.3.1 流动-反应基本方程	177
5.3.2 溶解-沉淀波的冲击波结构	178
5.3.3 溶解-沉淀波结构特征	180
5.4 相干原理与溶解-沉淀波结构形成的动力学	181
5.4.1 二组分色层分离的一般方程和 x 、 y 平面上特征曲线的构成	182
5.4.2 任意初始变化(扰动)的分解与相干原理	183
5.5 热液成矿分带的溶解-沉淀波结构	185
5.5.1 热液成矿分带的性质	185
5.5.2 热液成矿分带的本质	186
5.5.3 热液成矿分带的结构特征与形成机制	186
参考文献	188
第六章 地球化学场时-空结构的自组织临界性	190
6.1 自组织临界现象理论	191
6.1.1 自组织的临界性——沙堆模型	191
6.1.2 自组织的临界性理论	194
6.2 地球化学场时-空结构的基本特征	198
6.2.1 地球化学场的特点	198
6.2.2 粤北韶关地区地球化学场的时-空结构	199
6.2.3 湘南地区地球化学场的时间结构	202
6.3 地球化学场时-空结构形成的动力学机制分析	206
参考文献	207
第七章 岩浆期后成矿作用动力学过程的数学模型及计算机模拟系统	208
7.1 数学模型	208
7.1.1 热液渗流的数学模型	208
7.1.2 温度演化史的数学模型	209
7.1.3 多组分化学反应、多物种化学输运耦合动力学模型	209
7.2 数值方法	211
7.2.1 温度方程的有限元法	212

7.2.2 流函数方程的有限元法	213
7.2.3 组分总浓度方程的有限元法	215
7.3 模拟系统软件使用说明	215
7.3.1 主要功能	215
7.3.2 系统运行环境	215
7.3.3 软件运行	215
7.3.4 参数输入	215
7.3.5 模拟计算	220
7.3.6 输出结果	221
参考文献	222
结束语	223
英文摘要	226

CONTENTS

Preface

1 The theoretical systematics and methodology of the dynamics of ore-forming processes	1
1.1 The theoretical systematics of the dynamics of ore-forming processes	3
1.2 The methodology of the dynamics of ore-forming processes	19
References	24
2 The dynamics of ore-forming processes of the stratabound type skarn copper ore deposits—Case study of Tongling stratabound type skarn copper ore deposits of Anhui Province	30
2.1 The geological and geochemical characteristics of the Tongling stratabound type skarn copper ore deposits	30
2.2 The dynamical theory of the coupled process of heat and mass transfer and fluid-rock interactions	51
2.3 The theoretical analysis of the dynamics of ore-forming processes in Tongling stratabound type skarn copper ore deposits	55
2.4 The differential solubility of minerals in different rock environment and the ore-forming processes	62
2.5 The dynamical analysis for heat and fluid flow in Tianmashan and Tongguanshan ore deposits in Tongling district	64
2.6 The dynamical analysis for the coupled process of fluid flow-chemical reactions in Tongling sulfide ore deposits	71
References	76
3 The dynamics of ore-forming processes of the porphyry copper ore deposits—Case study of Dexing porphyry copper ore field, Jiangxi Province	78
3.1 The characteristics of ore formation of Tongchang porphyry copper ore deposit, Dexing	78
3.2 The dynamical research on coupled transport-chemical reactions of hydrothermal ore-forming processes in Tongchang porphyry copper ore deposit	92
3.3 The hydrodynamic fractal dispersion mechanism of the ore-forming processes	108
References	116
4 The dynamics of ore-forming processes in volcanic-subvolcanic hydrothermal ore deposit—Case study of Yinshan polymetallic ore deposit, Dexing	119

4.1	The geological characteristics of Yinshan polymetallic ore deposit	119
4.2	The study of ore zoning	122
4.3	The study of genesis of the ore deposit	134
4.4	The study of dissolubility of principal ore-forming chemical elements	139
4.5	The study of temperature field and velocity field of hydrothermal fluid of ore formation	155
4.6	Conclusions	169
	References	172
5	The dissolution/precipitation wave structure of the hydrothermal ore zoning	175
5.1	The nature of the problem of ore zoning	175
5.2	Outline of Д. С. Коржинский's theory of infiltration metasomatic zoning	176
5.3	The theory of coupled process of infiltration and dissolution/ precipitation reactions and the structural characteristics of dissolution/ precipitation waves	177
5.4	The principle of coherence and the dynamics of formation of the dissolution/precipitation wave structure	181
5.5	The dissolution/precipitation wave structure of hydrothermal ore zoning	185
	References	188
6	Self-organized criticality of the spatio-temporal structure of the geochemical fields	190
6.1	The theory of self-organized criticality phenomena	191
6.2	The basic characteristics of the spatio-temporal structure of the geochemical fields	198
6.3	The analysis of the dynamical mechanisms of formation of the spatio- temporal structure of the geochemical fields	206
	References	207
7	The mathematical model and computer simulation system for post-magmatic dynamical process of ore formation	208
7.1	The mathematical model	208
7.2	Numerical methods	211
7.3	Instructions for use of the software system of simulation	215
	References	222
	Concluding Remarks	223
	Summary in English	226

第一章 成矿作用动力学的 理论体系与方法论

矿床是一种复杂系统，而成矿作用则是一种复杂的动力学过程。矿床成因的基本问题，归根结底是成矿作用的动力学问题。近一二十年来，国际上在地球化学研究中，出现了一种从平衡态热力学转向非平衡态热力学，由热力学转向动力学的发展趋势，表现为在理论地球化学中继地球化学热力学之后兴起了地球化学过程动力学的新分支学科。促使研究重点从热力学向动力学转移的主要原因是，热力学只能指出过程自发进行的可能性、方向和限度，却不能解决系统状态变化的速率、机制和过程，而动力学的任务恰恰在于研究系统中物质运动的速率、机制和过程。因而动力学既能与热力学相辅相成，共同研究系统中物质运动的基本规律，又能补充热力学之不足，对物质运动规律作较深层次的进一步探索。

“动力学”一词的原义泛指英文中的“kinetics”（化学动力学）和“dynamics”（动力学）。kinetics（或 chemical kinetics）研究化学反应的速率和历程（或机制）。所谓“反应历程”（或“反应机制”）就是指反应物分子在变为产物分子的过程中所经历的具体途径与步骤。而“dynamics”则是研究物体在力的作用下宏观运动的速率和机制。动力学的较完整的涵义是某种作用（或物质运动）的速率（rate）、机制（mechanism）和过程（process）。“地球化学动力学”在国外文献中称之为“地球化学过程的动力学”[kinetics (dynamics) of geochemical processes]^[1,2]。中文中的“作用”和“过程”都用“process”一词表述，但“process”包含时间因素，还有“发展”和“演化”的含义。因此，地球化学过程动力学的命名更符合动力学的涵义。为简洁计，国内也简称之为“地球化学动力学”。

地球化学过程动力学和地质过程动力学及地球物理过程动力学三者并列，共同隶属于地质过程动力学；而地球化学过程动力学按其研究对象之不同，又包含若干不同的分支领域，如图 1—1 所示。

成矿作用动力学是地球化学过程动力学中的一个重要分支领域和前沿学术方向，又是矿床地球化学和矿床成因理论中的一个新的学术方向。除原苏联曾有个别学者 B. C. Голубев 等^[3]和我国於崇文等^[4]发表过这一方面的专著之外，西方国家尚未见有同类著作。因此，成矿作用动力学基本上还是一个有待开发的空白领域。成矿作用动力学作为地球化学过程动力学的重要分支领域和前沿学术方向，进行这一方面的研究可以丰富地球化学过程动力学，发展理论地球化学，促进地球化学学科内容的更新。成矿作用动力学研究成矿作用的速率、机制和过程，它是矿床成因的核心问题。目前，国内外有关矿床成因的论著大多只从地质学、热力学和物理化学方面进行探讨，缺乏对成矿作用的速率、机制和过程这一矿床成因的核心问题的深入分析和研讨。因此，进行成矿作用动力学研究可以揭示成矿作用的本质，使矿床成因研究从静态上升到动态，从定性走向定量，对传统的矿床成因理论将有新的突

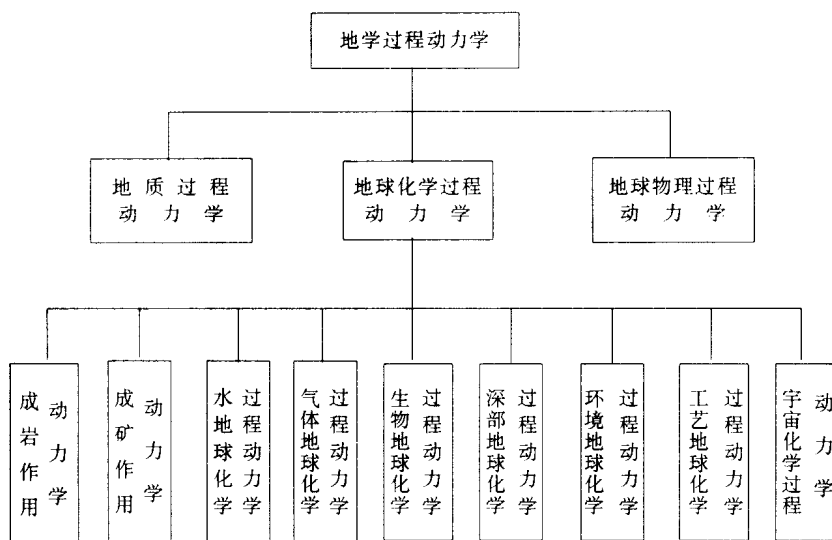


图 1—1 地球化学过程动力学的隶属关系及其分支领域

Fig. 1—1 The affiliation and branch-fields of the dynamics of geochemical processes

破。同时，矿床成因理论的深化又对成矿预测和矿产资源的开发具有重要的指导意义。

从“kinetics”和“dynamics”的含义可见，成矿作用动力学的研究对象主要是成矿物质化学运动（化学反应）和各种力学运动。研究化学反应的速率、机制和过程的是化学动力学，根据其从宏观或微观出发进行研究则有宏观化学动力学（macrokinetics）和微观化学动力学（chemical dynamics），而其最主要的研究领域则是水-岩（或流体-岩石）相互作用的化学动力学 [kinetics of water-rock (or fluid-rock) interactions]。根据运动物体——流体、流体-固体或固体的不同，研究其力学运动规律的理论有流体力学（fluid mechanics）、流变学（rheology）和弹性力学（elastic mechanics）。流体力学和物理化学转变相耦合而又有物理化学流体力学（physicochemical hydrodynamics），其中又根据物理化学转变之为化学转变（化学反应）或物理转变（相变）而有输运-化学反应耦合过程动力学（dynamics of coupled transport-reaction）和输运-相变耦合过程动力学（dynamics of coupled transport-phase transition）以及介于二者之间的界面现象物理化学流体力学（physicochemical hydrodynamics of interfacial phenomena）。其次，流变过程和化学反应相耦合而有流变-反应耦合过程动力学（dynamics of coupled rheologo-chemical processes）[力学-化学耦合动力学（dynamics of mechano-chemical coupling）]。此外，弹性力学过程和流体力学相耦合有构造物理-流体力学（tectonophysical hydrodynamics）。在分别进行化学动力学和各种动力学研究的基础上就可以进一步上升到对复杂系统和复杂过程深层次、普遍动力学规律的研究——自组织（self-organization）和分形与混沌动力学（fractal and chaotic dynamics）以及非线性科学中的其他理论和方法——自组织临界性理论（self-organized criticality）和重正化群方法（renormalization group method）。以上各种动力学研究相互连结、交叉而成一个网络，构成了成矿作用动力学的理论体系，如图 1—2 所示。

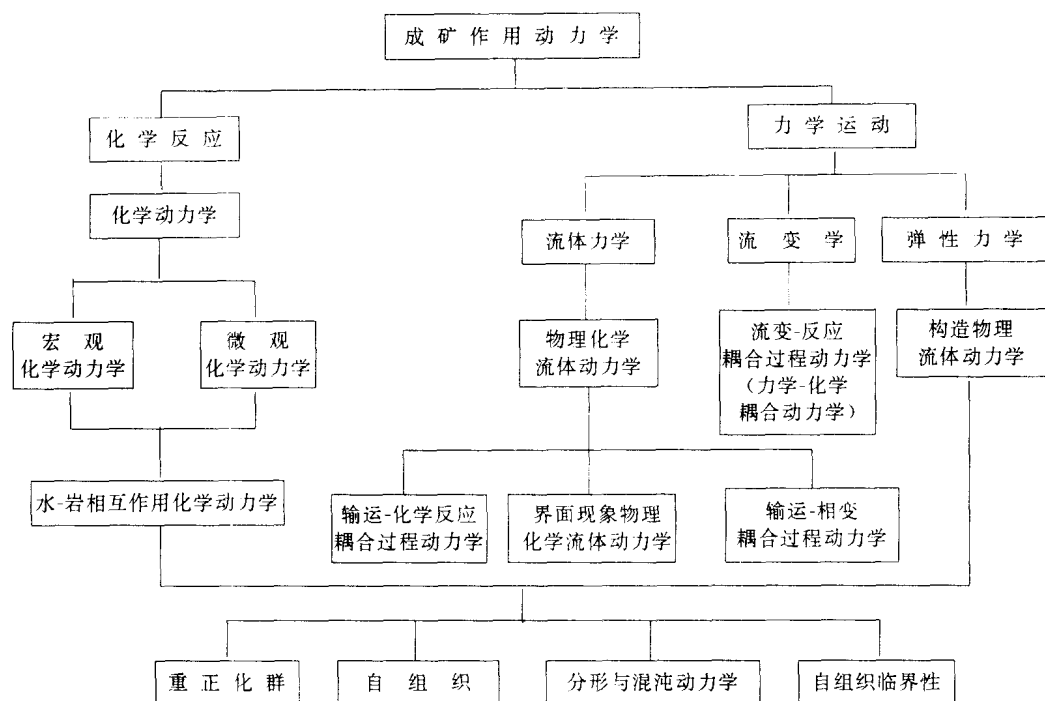


图 1—2 成矿作用动力学的理论体系

Fig. 1—2 The systematics of the dynamics of ore-forming processes

1.1 成矿作用动力学理论体系

1.1.1 水-岩相互作用的化学动力学^[5]

化学动力学研究化学反应的速率与机制(历程)。自然界中所见的化学反应有可逆反应和不可逆反应,均相反应和多相反应;从反应的性质来看则有溶解、沉淀反应,吸附和离子交换反应以及氧化、还原反应等。此外,通常也将流体中的成核作用和生长过程包括在内。然而,最常见并且研究得最多的则是水或含水流体与矿物、岩石之间的化学反应,通常简称为“水-岩相互作用”(water-rock interactions)或“流体-岩石相互作用”(fluid-rock interactions)。各种风化、淋滤矿床(如风化壳镍矿床、风化壳稀土矿床、风化壳铝土矿床等)、硫化物矿床氧化带的次生富集矿床、砂岩氧化带的铀矿床、黑色页岩中的稀有元素和贵金属矿床、某些沉积矿床以及围岩热液蚀变和交代矿床的形成都包含着不同类型和不同复杂程度的水-岩相互作用。因此,水-岩相互作用的化学动力学研究对揭示上述成矿、成岩地球化学过程的速率与机制具有十分重要的意义。

一般,水-岩相互作用的化学动力学研究从矿物溶解作用的动力学实验开始,通过确定溶解反应的速率定律,最后建立水-岩相互作用的动力学模型。A. C. Lasaga^[5]曾对水-岩相互作用的化学动力学进行过详细分析。

(1) 矿物的溶解作用