

热液成矿作用 动力学

於崇文等著

中国地质大学出版社

热液成矿作用动力学

於崇文 岑 况 鲍征宇 陈跃庭 著

国家自然科学基金和
地质行业科学技术发展基金
联合资助项目

中国地质大学出版社

• (鄂)新登字第 12 号 •

© 热液成矿作用动力学

於崇文 岑 岑 鲍征宇 陈跃庭 著

出版发行 中国地质大学出版社 (武汉市·鲁磨路 31 号邮编 430074)

责任编辑 耿小云 责任校对 熊华珍

印 刷 湖北省地图印刷厂

开本 787×1092 1/16 印张 20 字数 510 千字

1993 年 12 月第 1 版 1993 年 12 月第 1 次印刷 印数 1—500 册

ISBN 7-5625-0757-0/P·266 定价 19.50 元

序

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是成矿作用的动力学。

近一二十年来，国际上在矿床学和地球化学研究中，出现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向，但现在尚处于幼年时期，未臻成熟。虽然动力学研究的论文散见于各种刊物和会议文集，但紧密结合成矿作用者较为罕见，至于总结、上升并系统化为成矿作用动力学的专著则尚未见其公开出版。鉴于此，本书作者对“七五”期间所承担的国家自然科学基金与地质行业基金联合资助项目《成矿作用的发生》的研究成果进行了认真的总结，并以此为基础，补充了近年来有关动力学方面国外重要的新进展，形成了一部专著。作者撰写本书的目的有二：一是在矿床成因论中提出成矿作用动力学新的学术方向，二是将成矿作用动力学发展成一个初步的体系。根据以上考虑，将书名定为《热液成矿作用动力学》。

热液成矿作用动力学体系由以下各章组成：第二章是水-岩相互作用的化学动力学；第三章和第四章分别是多孔介质和断裂、裂隙介质中的流体动力学；第五章是物理化学流体动力学；第六章是渗滤交代作用的化学机制；第七章是热致与流体驱动断裂构造动力学。

本书第二、三、四、六各章是作者的研究成果，第五、七两章则主要由国外文献资料选编综合而成，其目的是使全书内容构成热液成矿作用动力学的一个相对完整的初步体系。本项目的研究工作和本书的撰写是在於崇文的指导下进行的。於崇文撰写了序和第一、五、七章；岑况撰写了第二、六章；鲍征宇撰写了第四章；陈跃庭、鲍征宇撰写了第三章。全书初稿完成后由於崇文统一整理定稿。

作者

目 录

第一章 地球化学动力学的研究现状与进展.....	(1)
第二章 水岩相互作用的化学动力学	(16)
第一节 水岩反应的反应速率的理论模型	(17)
第二节 矿物的离解反应动力学方程	(19)
第三节 实验方法和速率方程的实验确定	(22)
第四节 反应进展度、质量迁移和离解过程的计算机模拟	(24)
第五节 水岩反应的机理	(26)
第六节 微斜长石、钠长石和更长石的离解动力学	(29)
第七节 矽卡岩矿物的离解动力学	(50)
第八节 碳酸盐矿物的溶解动力学实验研究	(74)
第九节 水岩体系保持反应活性的临界驻留时间	(90)
参考文献	(95)
第三章 多孔介质中热液成矿作用的流体动力学.....	(100)
第一节 多孔介质中热质迁移的数学模型.....	(100)
第二节 多孔介质流体动力学方程的数值分析方法.....	(106)
第三节 研究实例：云南个旧锡—多金属成矿区老厂电气石细脉带矿床温度— 热液流速场数值模拟.....	(112)
参考文献.....	(123)
第四章 断裂、裂隙介质中热液成矿作用的流体动力学.....	(124)
第一节 断裂、裂隙介质中热液运动的动力学模型.....	(124)
第二节 两水平板之间的流体运动.....	(130)
第三节 热液在竖直板之间的运动特征.....	(133)
第四节 成矿热液的动力学性质.....	(156)
第五节 研究实例：云南个旧锡—多金属成矿区老厂矿田电气石锡石细脉带矿 床热液成矿作用动力学分析.....	(176)
参考文献.....	(184)
第五章 物理化学流体动力学与成矿作用.....	(190)
第一节 对流与结晶作用耦合过程的动力学.....	(190)
第二节 化学反应-输运耦合过程的动力学	(201)
参考文献.....	(217)

第六章 渗滤交代成岩成矿作用的化学机制	(219)
第一节 多相多组分化学反应平衡分析的理论.....	(220)
第二节 渗滤交代矽卡岩的地质地球化学特征.....	(222)
第三节 矿物的溶解度.....	(227)
第四节 渗滤脉状矽卡岩形成过程的计算机模拟.....	(241)
第五节 矽卡岩形成后成矿作用与热液蚀变的计算机模拟.....	(245)
第六节 碳酸盐体系渗滤交代的质量迁移.....	(251)
参考文献	(259)
 第七章 热致与流体驱动断裂构造动力学与成矿作用	(263)
第一节 流体驱动断裂的形成机制.....	(263)
第二节 岩石孔隙流体的差异热膨胀与岩石断裂作用.....	(274)
第三节 岩浆侵入体周围断裂系统的分布及其对于成矿的控制作用.....	(278)
第四节 岩浆结晶作用过程和侵入体—围岩系统的应力演化与断裂的发生与发 展.....	(287)
第五节 实例.....	(302)
参考文献	(307)

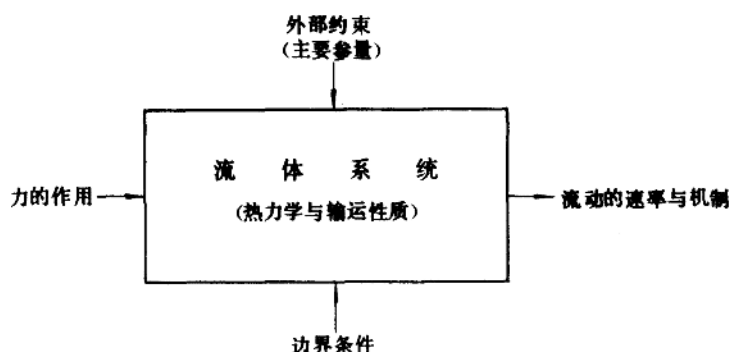
Contents

Chapter I	The Status and Recent Development in the Field of Geochemical Dynamics	(1)
Chapter II	Chemical Dynamics of Water-Rock Interaction	(16)
1.	Theoretical Rate Models of Water-Rock Interaction	(17)
2.	Dynamic Equations of Mineral Dissolution Reactions	(19)
3.	Experimental Methods and Determination of Rate Equations by Experiments	(22)
4.	Computer Simulation of Reaction Progress, Mass Transfer and Dissolution Processes	(24)
5.	Mechanism of Water-Rock Interactions	(26)
6.	Dissolution Dynamics of Microcline, Albite and Oligoclase	(29)
7.	Dissolution Dynamics of Skarn Minerals	(50)
8.	Experimental Investigation of Dissolution Dynamics of Carbonate Minerals	(74)
9.	Critical Stay Time for Maintaining Reaction Activity of Water-Rock Systems	(90)
References		(95)
Chapter III	Dynamics of Hydrothermal Ore-Forming Fluids in Porous Medium	(100)
1.	Mathematical Model of Mass-Heat Transfer in Porous Medium	(100)
2.	Numerical Methods Dealing with Fluid Dynamic Equations in Porous Medium	(106)
3.	Study Case: Numerical Simulation of Temperature-Velocity Field of Hydrothermal Fluid in Laochang Veinlet Tourmaline Deposit, Gejiu Tin-Polymetallic Ore Field, Yunnan Province	(112)
References		(123)
Chapter IV	Dynamics of Hydrothermal Ore-Forming Fluids in Rock Cracks	(124)
1.	Dynamic Model of Hydrothermal Fluid Motion in Rock Fractures or Cracks	(124)
2.	Fluid Motion Confined between Two Horizontal Plates	(130)
3.	Characteristics of Fluid Motion Confined between Two Vertical Plates	(133)
4.	Dynamic Parameters of Ore-Forming Fluid	(156)

5. Study Case; Dynamic System Analysis of Metallogenesis of Hydrothermal Fluid in Laochang Veinlet Tourmaline-Cassiterite Deposit, Gejiu Tin-Polymetallic Ore Field, Yunnan Province	(176)
References	(184)
Chapter V Physico-Chemical Fluid Dynamics and Metallization	(190)
1. Dynamics of Convection-Crystalization Coupled Processes	(190)
2. Dynamics of Reaction-Transfer Coupled Processes	(201)
References	(217)
Chapter VI Chemical Mechanism of Rock-Forming And Ore-Forming Processes by Infiltration and metasomatism	(219)
1. Equilibrium Analysis Theory of Multi-Facies and Multi-Component Reactions	(220)
2. Geological and Geochemical Characteristics of Infiltration-metasomatism Skarn	(222)
3. Dissolubility of Minerals	(227)
4. Computer Simulation of the Forming Process of Infiltrated Veinshaped Skarn	(241)
5. Computer Simulation of Mineralization and Hydrothermal alteration after Skarn Formation	(245)
6. Mass Transfer by Infiltration and metasomatism in Carbonate Systems	(251)
References	(259)
Chapter VII Tecnodynamics of Heat-Induced and Fluid-Driven Fractural Structures and Ore-Forming Processes	(263)
1. Forming Mechanism of Fluid-Driven Fractures	(263)
2. Differential Dilation of Fluid in Porous Rock and Rock Fracturing	(274)
3. Distribution of Fracture System around a Plutonic Body and the Controlling Effects to Minerallization	(278)
4. Magma Crystallization, Stress Evolution of Pluton-Surrounding Rock System, and the Onset and Development of Fractures	(287)
5. Study Cases	(302)
References	(307)

第一章 地球化学动力学的研究现状与进展

地球内的各种自然过程大多进行得非常缓慢，地质系统在长时间内由于受到多方面扰动的影响很难达到永恒的、真正的平衡状态。实际上整个地球是一个演化着的开放系统，经常处于非平衡状态之中，经历着一个动力学的发展过程。因此，只有对于地质过程进行动力学研究才能深刻地理解和掌握其规律。动力学是运动科学的一部分。在物理学中，运动科学称为“力学”，它又进一步分为运动学和动力学。前者只涉及物体运动的几何关系，而后者则研究力对运动的影响。动力学中又有化学动力学(chemical kinetics)与流体动力学(fluid dynamics or hydrodynamics)。化学动力学研究化学反应的速率、各种条件对于速率的影响以及化学反应的历程(或机制)(mechanism)。流体动力学则是研究流体在力的作用下的宏观运动速率与机制。流体动力学现象的发生可以用下列图解来表示：



将动力学研究引入到地质学中来是近 20 年来地质科学的一个新发展。大体上，70 年代初化学动力学开始被应用于地质过程的研究，而流体动力学则迟至 70 年代末才被引入地质科学。虽然引入的时间不长，但是发展却很迅速，同时由于动力学与地质学的结合，开辟了许多动力学研究的新领域，发现了不少动力学的新现象并且提出了动力学方面的一些新概念。因此可以说，至今除地球动力学(geodynamics)外，已经在地质科学中出现了地质化学动力学(geological chemical kinetics)和地质流体动力学(geological fluid dynamics)这两个崭新的科学领域。除此之外，我们还着重指出，两类不同作用机制之间耦合过程的动力学是特别富有生命力和很有发展前景的边际前沿领域。比如物理化学转变与流体运动相耦合而产生“物理化学流体动力学”(physicochemical hydrodynamics)，对于深入揭示地质过程的动力学具有极重要的意义。此外，应力、化学反应和输运相耦合而产生的“力学-化学相互作用动力学”(dynamics of mechano-chemical interactions)是变质作用动力学研究的新进展。我们把这些领域联合在一起，把它们统称为“地球化学动力学”(geochemical dynamics)：

地球化学动力学

化学动力学

水-岩相互作用化学动力学

力学-化学相互作用动力学

流体动力学

物理化学流体动力学

根据国际上近 20 年来的发展情况,作者将地球化学动力学方面的研究与进展归纳成十二个方面,以下对这些方面分别略加分析。

一、反应动力学

这一方面的研究涉及矿物离溶(exsolution)、元素分离、有序-无序分布、矿物生成以及同位素交换等的化学动力学。例如, Yund (1974) 对碱性长石中的离溶, Mc Callister (1974) 对顽火辉石从过饱和透辉石中的离溶, Saxens 对辉石中的离溶和 Fe^{2+} -Mg 的有序-无序分布的研究; Eugster 和 Ilton (1983) 对变质环境中的 Mg-Fe 分离的研究。Sipling 和 Yund (1974) 对碱性长石中的 Al/Si 无序分布的研究; Cowper 和 Rickard (1989) 对于黄铜矿的形成和 Rickard (1989) 对于硫化亚铁的沉淀过程以及 Anderson 和 Chai (1974) 对于热液条件下方解石和水之间氧同位素交换所进行的研究等。

二、硅酸盐熔体的成核作用和生长动力学

这方面的研究工作涉及硅酸盐熔体的成核理论和生长动力学、岩浆熔体的结晶作用、岩浆化学动力学以及硅酸盐熔体和岩石中的扩散作用等。例如, Kirkpatrick (1983) 对硅酸盐熔体中的成核理论和 Baronnet (1984) 对硅酸盐的生长动力学, Dowty (1980) 对成核理论、晶体生长和火成岩结晶作用的研究。Kirkpatrick (1981) 对火成岩的结晶作用, Lofgren (1980) 对硅酸盐熔体动力学结晶作用的实验研究; Maaløe (1985) 对岩浆化学动力学, Hofmann (1980) 对自然硅酸盐熔体中的扩散作用以及 Dukhuizen 和 Casey (1989) 对岩石中溶质扩散的研究等。

三、水-岩相互作用

这一方面的研究包括水-岩相互作用、矿物溶解速率或热液反应速率、长石的离解动力学、方解石和白云石的离解动力学等。例如, Lasaga (1984) 对水-岩相互作用的化学动力学, Paces (1973) 对地下水和花岗质岩石之间的稳态动力学和平衡, Rimstidt 和 Barnes (1980) 对二氧化硅-水反应的动力学, Dibble 和 Tiller (1981) 对水-岩相互作用中的界面控制反应的研究; Wood 和 Walther (1983) 对热液反应的速率, Barnes、Downs 和 Rimstidt (1982) 对热液反应速率的实验测定, Helgeson (1970) 对热液流动系统中的反应速率, Murphy、Oelkers 和 Lichtner (1989) 对表面反应与扩散对于矿物溶解与生长速率的控制, Berner (1978) 对地表条件下矿物溶解的速率控制的研究; Lagache (1965, 1976) 对碱性长石溶解和蚀变, Wollast (1967) 对 K-长石蚀变, Bunsenberg、Clemency (1976) 对长石溶解的动力学研究; Plummer 和 Wigley (1976), Sjöberg (1976), Plummer、Wigley 和 Parkhurst (1978) 对方解石溶解动力学的研究; Wallin、Bjerle (1989) 对石灰岩溶解速率模型的对比研究以及 Herman 和 White (1985) 对白云石溶解动力学的研究; 於崇文等 (1987, 1988, 1992) 对于方解石、白云石、K-长石、钠长石、钙长石、透辉石、钙铁辉石及钙铝石榴石的溶解动力学的实验研究; Aagaard 和 Helgeson (1982), Helgeson、Murphy 和 Aagaard (1984), Murphy 和 Helgeson (1987), Murphy 和 Helgeson (1989) 对于矿物与水溶液之间反应速率的热力学与动力学约束的理论研究等。

四、状态方程, 热力学与输运性质

关于状态方程研究的有 Tanger 和 Pitzer (1989) 对于 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 的热力学——近临界区的新状态方程, Bischoff 和 Pitzer (1989) $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 系的气-液关系的研究。关于水溶液中物种和含水电解质的热力学性质的有 Cobble、Murray、Turner 和 Chen (1982) 及 Christopher (1983) 的研究。Roedder (1982) 关于流体对高温高压指示意义的研究。关于高温高压下电解质和含水物种的热力学与输运性质的有 Helgeson (1982), Oelkers 和 Helgeson (1988) 关于离子扩散系数, Shock 和 Helgeson (1988) 关于状态方程, Shock、Helgeson 和 Sverjensky (1989) 关于标准偏摩尔性质等研究。关于热力学和输运性质的有 Yoder (1982) 对于岩浆输运性质, Buback (1982) 对于流体的光谱学, Barnes (1982) 对于高温高压下的溶解度及 Kestin (1982) 对于流体的粘度和热导率等的研究。

五、输运

关于常温常压下岩石中输运问题的有 Neretnieks、Abelin、Birgersson、Moreno 和 Rasmuson (1987) 对于断裂岩石中化学输运, Bjornsson、Stefansson (1987) 对于地热库藏中的热质输运研究。Neretnieks (1980) 对于岩石中的扩散, Grisak 和 Pickens (1980) 对于断裂介质中的溶质输运, Tang (1981) 对于断裂多孔介质中污染物输运, Rasmuson 和 Neretnieks (1986) 对于结晶岩石中快速通道内放射核输运的研究。Neretnieks (1983) 对于土地中断裂流动弥散机制, Rasmuson (1985) 对于离散断裂网络中流体动力弥散作用的研究等。

六、双扩散对流

Huppert (1986) 关于流体力学之引入地质学进行了综合性的评述。自从在海洋学研究发现双扩散对流现象以后不久, 大约在十余年前就被移植于地质学研究工作中 (Turner, 1985; Huppert 和 Turner, 1981)。如, Huppert (1990) 对于固结作用的流体力学进行了综述。Huppert 和 Sparks (1984) 对于岩浆中因结晶作用引起的双扩散对流, Lowell (1985) 对于部分熔融硅酸盐系统中的双扩散对流, Turner 和 Gustafson (1981) 及 Thompson 和 Szekely (1988) 对于垂直侧壁结晶作用以及 Huppert、Sparks、Wilson 和 Htallworth (1986) 对于斜坡结晶作用的研究。Sparks、Huppert 和 Turner (1984) 对于演化中岩浆房的流体动力学, Clark、Spera、Yecen (1987) 对于岩浆房中稳态双扩散对流的研究。将双扩散对流理论应用于矿床学研究的有 Turner 和 Gustafson (1978) 及 Mc Dougall (1984) 对于海底热卤水块状硫化物矿床的成因研究等。

七、热、质输运

70 年代以来 Norton 等人应用质量、能量和动量守恒定律对于热液系统的热、质输运进行了较系统的研究。综合十余年来的研究成果, Norton (1984) 提出了热液系统的理论。历年来, 在这一方面所进行的工作有 Norton、Knapp (1977) 和 Norton、Knight (1977) 对于热液系统中输运现象的研究。Norton (1978) 对于热液流体的源线、源区和路径, Villas 和 Norton (1977) 对于环流水热流体与五月花岗岩株之间不可逆质量迁移的研究。Cathles (1981) 对于流体流动和热液矿床成因, Norton (1982) 对于含铜深成岩环境中典型流体与热输运现象的研究等。

八、输运和化学反应

输运和化学反应两种机制耦合过程的动力学行为是地球化学中经常发生的自然现象。属于这一范畴的工作有: Lane、Rawson、Allen 和 Burnell (1989) 对于玄武岩-地下水流动实验中输运与化学反应的耦合过程, Lasaga (1989) 对于变质系统中流体流动和化学反应动力学以及 Phillips (1990) 对于岩石组构中流动控制的化学反应的研究。Ortoleva、Auchmuty、Chadam、Hettner、Merino、Moore 和 Ripley (1986) 对于氧化还原前锋的扩展与带状模式, Merino、Moore、Ortoleva 和 Ripley (1986) 对于层控铁、铜硫化物矿床中的矿物分带的研究。Fletcher、Hofmann (1974) 对于扩散和扩散-渗滤交代模型, Frantz 和 Weisbrod (1974) 对于 $K_2O-SiO_2-Al_2O_3-H_2O-HCl$ 系统中的渗滤交代作用的研究。Guy、Conrad、Cournil 和 Kalaydjian (1984) 对于地质学中非线性对流问题中的化学不稳定性与“振荡”, Guy (1987) 对于地质学中的非线性对流问题的研究。Irvine (1980) 对于 Muskox 侵入体中的岩浆渗滤交代、双扩散分离结晶和堆积生长的研究。

九、成矿元素的输运与沉淀

这一方面已发表的研究成果计有 Eugster 和 Wilson (1985) 对于与花岗岩伴生的热液系统中成矿元素的输运与沉淀, Eugster (1984) 对于花岗岩与热液矿床, Anderson (1973) 对 $100^{\circ}C$ 温度下方铅矿和闪锌矿的热液输运与沉淀, Schröcke、Trumm 和 Hochleitner (1984) 对于水溶液中钨的输运和二氧化钨的沉淀, Jackson、Helgeson (1985) 对于锡的热液输运与沉淀的化学与热力学约束的研究。Seward (1984) 对于热液系统中金的输运与沉淀, Fyfe 和 Kerrich (1984) 对于金的自然富集过程的研究。MounTain 和 Wood (1988) 对于热液中铂、钯的溶解度、输运和沉淀的化学控制的研究。

十、成矿作用的动力学

於崇文等在以成矿作用与时-空结构理论观点(於崇文、沈镛立、岑况, 1985) 为立足点所建立的地球化学理论体系与方法论(於崇文, 1986; 於崇文、骆庭川、鲍征宇、胡云中、梁约翰、魏秀喆等, 1987) 的指导下, 对于成矿作用的动力学进行了一系列的研究(於崇文, 1987; 於崇文等, 1987; 於崇文等, 1988; 於崇文, 1989, 1990, 1991; 於崇文、蒋耀淞, 1990), 并建立起热液成矿作用动力学的初步体系(於崇文等 1988; 於崇文, 1989; 於崇文、岑况、鲍征宇、陈跃庭, 1992)。

十一、热致与流体驱动的断裂作用

70 年代以后, 国际上对于与岩浆侵入及成矿活动密切相关的构造断裂作用开展了较深入的研究; 这些断裂的特点是其构造位向与区域构造截然不同, 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”。这一方面的工作有 Koide 和 Bhattacharji (1975) 对于岩浆侵入体周围断裂的形成及其在矿石定位中的作用, Knapp 和 Norton (1981) 对于冷却侵入体环境中的岩浆结晶作用与应力演化的研究。Spence、Sharp 和 Turcotte (1987) 对于浮力驱动的断裂扩展及 Lister (1990) 对于浮力-驱动的流体断裂的研究。Shaw (1980) 对于岩浆输运的断裂机制和 Spera (1980) 对于岩浆输运若干方面的研究等。

十二、动力学模型

对于地质作用的动力学研究最终概括为理论模型(modeling),其通常的表现形式即为种种动力学模型。一种成功的动力学模型既是自然过程的逼近和一定程度的真实反映,又应能定量地预测自然过程的发生与进行。Elder(1977)的热液矿石成因模型和Lichtner(1985)的热液系统中化学反应和质量迁移相结合的连续介质模型就是其中的两例。80年代以来Ortoleva及其研究集体系统地提出了一系列地球化学自组织的模型,其中包括Ortoleva(1984)对于地球化学-阶相转变的非线性波传播与模式形成的模型,Ortoleva(1987)对地球化学自组织的模型,Ortoleva、Merino、Moore和Chadam反应-输运反馈的模型化,Ortoleva、Chadam、Merino和Sen(1987)的反应-渗滤不稳定性,Dewers、Ortoleva(1990)的变质分异的力学-化学模型,Dewers和Ortoleva(1989)的受应力岩石中的力学-化学耦合过程,Ortoleva、Merino和Strickholm(1982)的非均质受应力岩石中变质分层的化学动力学,Feeney、Schmidt、Strickholm、Chadam和Ortoleva(1983)的周期性沉淀与质点生长波,Ortoleva和Schmidt(1985)的化学波的结构和种类等。

以上简短的综述已经足以反映近二十年来地球化学动力学研究涉及范围之广,发展速度之快和探索程度之深。前已述及,动力学研究的高度概括与数学抽象是作用机制的模型化,即建立动力学模型。模型成败与优劣的标志是它们对于自然过程的逼近和反映真实的程度以及它们预测自然过程发生与进行的速度与机制的可靠程度与把握(当然有时由于“混沌状态”(chaos)的出现,也可能产生一定程度的不可预测性,这也必须予以适当的估计)。简言之,就是模型来自实际,又必须回归实际并指导实践。如果用这一标准加以衡量,则现在已经完成并积累起来的研究成果在联系自然实际并解决实际问题方面还存在不小的差距,还只是在仿真的长途摸索前进。在自然过程里,成矿作用是地质科学中既重要且复杂的过程之一。矿床是一种高度复杂的系统,它们具有多层次结构(由不同大小的部分所组成,各部分之间以复杂的方式相互连接)、多重时间标度、多种控制参量和多样的作用过程。矿床的形成又是不同速率并举、多种机制交织的极端复杂的动力学过程。将矿床作为整体、对它们的形成过程与机制进行全面、系统的研究,从这一角度来看,现有的动力学研究成果与确立“成矿作用动力学”的专门学术领域与方向这一目标尚相距甚远,至今仍是动力学研究中的一个薄弱环节。多年来对矿床地球化学与成矿作用动力学的研究实践使我们逐渐形成了这样一种看法,即矿床成因的基本问题是成矿作用的动力学,而后者核心则是成矿作用的发生,即矿化向成矿的转化。鉴于这一认识和依据作者多年来的研究工作,我们撰写了这一本专著,其动机有二:

- 一、在矿床成因论中提出“成矿作用动力学”这一新的学术方向。
- 二、将热液成矿作用动力学发展成一个初步体系,其主要内容包括:
 1. 水-岩相互作用的化学动力学;
 2. 多孔介质中热液成矿作用的流体动力学;
 3. 断裂裂隙中热液成矿作用的流体动力学;
 4. 物理化学流体动力学与成矿作用;
 5. 渗滤交代成岩成矿作用的化学机制;
 6. 热致与流体驱动断裂构造动力学与成矿作用。

提出上述热液成矿作用动力学体系既是为了指引和深化作者自己今后的工作,同时也为

了促进成矿作用动力学研究的发展。当然它还只是一个初步尝试, 还很不完善, 只能算是一个开端, 有待于进一步的充实、补充与发展。

以下所列举的文献可以基本反映地球化学动力学各个有关领域的研究现状与进展情况。

一、反应动力学

Anderson, T. F., Chai, H. T., 1974, Oxygen isotope exchange between calcite and water under hydrothermal conditions, in: Hofmann, A. W., Gilotti, B. J., Yoder, H. S., Jr., Yund, R. A., (ed.), *Geochemical Transport And Kinetics*, Carnegie Institution of Washington, Publication 634, pp. 219—227.

Cowper, M., Rickard, D., 1989, Mechanism of chalcopyrite formation from iron monosulphides in aqueous solutions ($<100^{\circ}\text{C}$, pH 24.5), *Chemical Geol.*, Vol. 78, pp. 325—341.

Eugster, H. P., Ilton, E. S., 1983, Mg-Fe fractionation in metamorphic environments, in: Hofmann, A. W., Gilotti, B. J., Yoder, H. S., Jr., Yund, R. A., (ed.), *Geochemical Transport And Kinetics*, Carnegie Institution of Washington, Publication 634, pp. 115—140.

Mc Callister, R. H., 1974, Kinetics of enstatite exsolution from supersaturated diopside, in: Hofmann, A. W., Gilotti, B. J., Yoder, H. S., Jr., Yund, R. A., (ed.), *Geochemical Transport And Kinetics*, Carnegie Institution of Washington, Publication 634, pp. 195—203.

Rickard, D., 1989, Experimental concentration-time curves for the iron (II) sulphide precipitation process in aqueous solutions and their interpretation, *Chemical Geol.*, Vol. 78, pp. 315—324.

Saxena, S. K., 1983, Exsolution and Fe^{2+} -Mg order-disorder in pyroxenes, in: Saxena, S. K., (ed.), *Kinetics And Equilibrium In Mineral Reactions*, Springer-Verlag, pp. 61—80.

Sipling, P. J., Yund, R. A., 1974, Kinetics of Al/Si disordering in alkali feldspars, in: Hofmann, A. W., Gilotti, B. J., Yoder, H. S., Jr., Yund, R. A., (ed.), *Geochemical Transport And Kinetics*, Carnegie Institution of Washington, Publication 634, pp. 185—193.

Yund, R. A., 1974, Coherent exsolution in the alkali feldspars, in: Hofmann, A. W., Gilotti, B. J., Yoder, H. S., Jr., Yund, R. A., (ed.), *Geochemical Transport And Kinetics*, Carnegie Institution of Washington, Publication 634, pp. 173—183.

二、硅酸盐熔体的成核作用和生长动力学

Baronnet, A. M., 1984, Growth kinetics of the silicates, A review of basic concepts, *Fortschr. Miner.*, Vol. 62, No. 2, pp. 187—232.

Dowty, E., 1980, Crystal growth and nucleation theory and the numerical simulation of igneous crystallization, in: Hargraves, R. B., (ed.), *Physics of Magmatic Processes*, Princeton University Press, Chap. Vol 10, pp. 419—485.

Dykhuisen, R. C., Casey, W. H., 1989, An analysis of solute diffusion in rocks, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 53, pp. 2797—2806.

Hofmann, A. W. , 1980, Diffusion in natural silicate melts; A critical review, in: Hargraves, R. B. , (ed.), Physics of Magmatic Processes, Princeton University Press, Chap. Vol. 9, pp. 385—417.

Kirkpatrick, R. J. , 1981, Kinetics of crystallization of igneous rocks, in: Lasaga, A. C. , Kirkpatrick, R. J. , (ed.), Kinetics of Geochemical Processes, Mineralogical Society of Amer, Chap. Vol. 8, pp. 321—398.

Kirkpatrick, R. J. , 1983, Theory of nucleation in silicate melts, American Mineralogist, Vol. 68, pp. 66—77.

Lofgren, G. , 1980, Experimental studies on the dynamic crystallization of silicate melts, in: Hargraves, R. B. , (ed.), Physics of Magmatic Processes, Princeton University Press, Chap. 11, pp. 487—551.

Maaløe, S. , 1985, Magma kinetics, in: Maaløe, S. , Principles of Igneous Petrology, Springer-Verlag, Chap. XI, pp. 230—288.

三、水-岩相互作用

於崇文、骆庭川、鲍征宇、胡云中、梁约翰、魏秀喆等, 1987, 《南岭地区区域地球化学》, 地质出版社, 第六章第四节成矿作用动力学, pp. 300—338.

於崇文、唐元骏、石平方、邓保林, 1988, 《云南个旧锡多金属成矿区内生成矿作用的动力学体系》, 中国地质大学出版社, 第五章第三、四、五节, pp. 199—259.

於崇文、岑况、鲍征宇、陈跃庭, 1992, 《内生成矿作用动力学》, 中国地质大学出版社, 第二章水-岩相互作用的化学动力学.

Aagaard, P. , Helgeson, H. C. , 1982, Thermodynamic and kinetic constraints on reaction rates among minerals and aqueous solutions, I. Theoretical considerations, Amer. Jour. Sci. , Vol. 282, pp. 237—285.

Barnes, H. L. , Downs, W. F. , Rimstidt, J. D. , 1982, Experimental determination of rates of hydrothermal reactions, Proc. Int. Symp. On Hydrothermal Reactions, Japan, pp. 217—239.

Berner, R. A. , 1978, Rate control of mineral dissolution under earth surface conditions, Amer Jour. Sci. , Vol. 278, pp. 1235—1252.

Busenberg, E. , Clemency, C. V. , 1976, The dissolution kinetics of feldspars at 25°C and 1 atm CO₂ partial pressure, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 40, pp. 41—49.

Dibble, W. E. , Jr. , Tiller, W. A. , 1981, Non-equilibrium water/rock interactions---I. Model for interface-controlled reactions, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 45, pp. 79—92.

Helgeson, H. C. , 1970, Reaction rates in hydrothermal flow systems, Econ Geol, Vol. 65, pp. 299—303.

Helgeson, H. C. , Murphy, W. M. , Aagaard, P. , 1984, Thermodynamic and kinetic constraints on reaction rates among minerals and aqueous solutions, II. Rate constants, effective surface area, and the hydrolysis of feldspar, Geochim. Cosmochim. Acta, Vol. 48, pp. 2405—2432.

Herman, J. S. , White, W. B. , 1985, Dissolution kinetics of dolomite; Effects of lithology and fluid flow velocity, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 49, pp. 2017—2026.

Lagache, M. , 1965, Contribution à l'étude de l'altération des feldspaths dans l'eau, entre 100 et 200°C, sous diverses pressions de CO₂, et application à la synthèse des minéraux argileux, *Bull. Soc. Fr. Mineral. Cristallogr.*, Vol. 88, pp. 223—253.

Lagache, M. , 1976, New data on the kinetics of the dissolution of alkali feldspars at 200°C in CO₂ charged water, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 40, pp. 157—161.

Lasaga, A. C. , 1984, Chemical kinetics of water-rock interactions, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 89, No. B6, pp. 4009—4025.

Murphy, W. M. , Helgeson, H. C. , 1987, Thermodynamic and kinetic constraints on reaction rates among minerals and aqueous solutions, III. Activated complexes and the pH dependence of the rates of feldspar, pyroxene, wollastonite, and olivine hydrolysis, *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 51, pp. 3137—3153.

Murphy, W. M. , Helgeson, H. C. , 1989, Thermodynamic and kinetic constraints on reaction rates among minerals and aqueous solutions, IV. Retrieval of rate constants and activation parameters for the hydrolysis of pyroxene, wollastonite, olivine, andalusite, quartz, and nepheline, *Amer. Jour. Sci.*, Vol. 289, pp. 17—101.

Murphy, W. M. , Oelkers, E. H. , Lichtner, P. C. , 1989, Surface reaction versus diffusion control of mineral dissolution and growth rates in geochemical processes, *Chemical Geol.*, Vol. 78, pp. 357—380.

Paces, T. , 1973, Steady-state kinetics and equilibrium between ground water and granitic rock, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 37, pp. 2641—2663.

Plummer, L. N. , Wigley, T. M. L. , 1976, The dissolution of calcite in CO₂-saturated solutions at 25°C and 1 atmosphere total pressure, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 40, pp. 191—202.

Plummer, L. N. , Wigley, T. M. L. , Parkhurst, D. L. , 1978, The kinetics of calcite dissolution in CO₂-water systems at 5° to 60° C and 0.0 to 1.0 atm CO₂, *Amer. Jour. Sci.*, Vol. 278, pp. 179—216.

Rimstidt, J. D. , Barnes, H. L. , 1980, The kinetics of silica-water reactions, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 44, pp. 1683—1699.

Sjöberg, E. L. , 1976, A fundamental equation for calcite dissolution kinetics, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 40, pp. 441—447.

Wallin, M. , Bjerle, I. , 1989, Rate models for limestone dissolution: A comparison, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 53, pp. 1171—1176.

Wollast, R. , 1967, Kinetics of the alteration of K-feldspar in buffered solutions at low temperature, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 31, pp. 635—648.

Wood, B. J. , Walther, J. V. , 1983, Rates of hydrothermal reactions, *Science*, Vol. 222, pp. 413—415.

四、状态方程, 热力学与输运性质

Barnes, H. L. , 1982, Measuring thermodynamically-interpretable solubilities at high

pressures and temperatures, in: Rickard, D., Wickman, F. E., (ed.), Chemistry And Geochemistry of Solutions At High Temperatures And Pressures, pp. 321—343.

Bischoff, J. L., Pitzer, K. S., 1989, Liquid-vapor relations for the system NaCl-H₂O; summary of the P-T-x surface from 300° to 500°C, Amer Jour. Sci, Vol. 289, pp. 217—248.

Buback, M., 1982, Spectroscopic investigations of fluids, in: Rickard, D., Wickman, F. E., (ed.), Chemistry And Geochemistry of Solutions At High Temperatures And Pressures, pp. 345—360.

Christopher, P. J., 1983, Thermodynamics of Geochemically Important Aqueous Electrolytes, University Microfilms International, University of California, Berkeley.

Cobble, J. W., Murray, R. C., Jr., Turner, P. J., Chen, K., 1982, High temperature thermodynamic data for species in aqueous solution, EPRI Rep. NP-2400 Research Project 1167-1, San Diego State University Foundation, San Diego.

Helgeson, H. C., 1982, Prediction of the thermodynamic properties of electrolytes at high pressures and temperatures, in: Rickard, D., Wickman, F. E., (ed.), Chemistry And Geochemistry of Solutions At High Temperatures And Pressures, pp. 133—177.

Kestin, J., 1982, Experimental determination of the viscosity and thermal conductivity of fluids, in: Rickard, D., Wickman, F. E., (ed.), Chemistry And Geochemistry of Solutions At High Temperatures And Pressures, pp. 295—319.

Oelkers, E. H., Helgeson, H. C., 1988, Calculation of the thermodynamic and transport properties of aqueous species at high pressures and temperatures: Aqueous tracer diffusion coefficients of ions to 1000°C and 5 kb, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 52, pp. 63—85.

Roedder, E., 1982, Natural occurrence and significance of fluids indicating high pressure and temperature, in: Rickard, D., Wickman, F. E., (ed.), Chemistry And Geochemistry of Solutions At High Temperatures And Pressures, pp. 9—39.

Shock, E. L., Helgeson, R. C., 1988, Calculation of the thermodynamic and transport properties of aqueous species at high pressures and temperatures; Correlation algorithms for ionic species and equation of state predictions to 5 kb and 1000°C, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 52, pp. 2009—2036.

Shock, E. L., Helgeson, H. C., Sverjensky, D. A., 1989, Calculation of the thermodynamic and transport properties of aqueous species at high pressures and temperatures; standard partial molal properties of inorganic neutral species, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 53, pp. 2157—2184.

Tanger, J. C., Pitzer, K. S., 1989, Thermodynamics of NaCl-H₂O: A New equation of state for the near-critical region and comparisons with other equations for adjoining regions, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 53, pp. 973—987.

Whally, E., 1982, The compression of liquids, in: Rickard, D., Wickman, F. E., (ed.), Chemistry And Geochemistry of Solutions At High Temperatures And Pressures, pp. 273—294.

Yoder, H. S., Jr., 1982, Experimental methods for determination of transport proper-