

全国

第三届构造地球化学学术讨论会

论文选集



云南科技出版社

全国

第三届构造地球化学学术讨论会
论 文 选 集

中国矿物岩石地球化学学会元素区域地球化学专业委员会

中国科学院地化所地球化学开放研究实验室

云南省地质学会

云南科技出版社

(滇)新登字04号

责任编辑：林德琼

封面设计：徐 芸

全国第三届构造地球化学学术讨论会论文选集

中国矿物岩石地球化学学会元素区域地球化学专业委员会
中国科学院地化所矿床地球化学开放研究实验室
云南省地质学会

云南科技出版社出版发行 (昆明市书林街 100号)

云南地质矿产局印刷厂印装

开本：787×1092 1/16 印张：12 字数：250千字

1994年12月第1版

1994年12月第1次印刷

印数：1—1000册

ISBN 7—5416—0612—X/P·13 定价：16.00元

SELECTIONS OF 3RD TECTONO—GEOCHEMICAL SYMPOSIUM OF CHINA

by

Element Geochemistry Commission of Mineralogy—

Petrology—Geochemistry Society of China

Ore Deposits Geochemistry Opening Lab, Institute of

Geochemistry, Academia Sinica

Geological Society of Yunnan Province

Yunnan Science and Technology Press

1994 • 6

序

不少科学工作者的实践结果曾启示，物体在应力差的作用下，其中的化学元素可以发生迁移和重分配。在元素重分配的过程中，一些原有的矿床可以受到改造、富化而成为更大或品位更高的矿床；在一些矿源层（岩）中，原属分散状态的成矿元素在一定条件下可以受到改造，在适当的构造部位和应力环境中形成工业富集，成为新的矿床。因此，开展对这种“构造成矿”作用及其规律性的研究，无疑是富于理论意义和实用意义的课题。这些课题既涉及构造地质学又涉及地球化学，只有把这两门学科结合起来，交叉研究，才能顺利地解决成矿作用的问题。笔者在平时从事构造与成矿关系研究的过程中，曾试图从这个角度和思路入手开展探索。1961年笔者创建中国科学院中南大地构造及地球化学研究室，组织这方面的专题研究，作出一些初步成果。1976年开始试用《构造地球化学》这门边缘学科的名称，印出教材，在中南矿冶学院开设课程，并给予定义，阐明了其研究范围、意义和作用，探索其研究方法及中型和大型构造与化学元素分配集散的关系等。与此同时，我国的一些构造地质学、地球化学及矿床学的科技工作者都从不同角度开展了对构造地球化学的研究。到80年代初，构造地球化学已经进入了成长壮大的发展阶段。1983年在长沙召开的全国第一届构造地球化学座谈讨论会，就是这个发展阶段的一个重要标志。在会上，涂光炽、陈国达、杨开庆、黎彤等老一辈地质学家都作了报告，他们给构造地球化学的研究和发展指明了方向，对我国构造地球化学的发展起到了指导、推动和促进的作用。1989年和1992年分别在贵阳和昆明召开了全国第二届和第三届构造地球化学学术讨论会，展示了构造地球化学在我国得到了迅速发展。正如涂光炽教授为第二届学术讨论会论文摘要汇编所作序中指出的：“这次学术讨论会的论文涉及面广，从大地构造、大区域的构造地球化学，经过矿田、矿床构造地球化学一直到微构造的构造地球化学，可以说，宏观与微观俱备。在方法上，从野外观察、剖析，室内各种分析测试到模拟实验，方法研究也一应俱全。这无疑显示了当前我国的构造地球化学发展水平的一个方面，也是重要的一个方面。”第三届学术讨论会的论文多达百余篇，展示了我国这一学科领域研究的新成就。会后遴选了其中的20余篇优秀论文，编辑成集。其中既有专论构造动力成矿机理的，又有联系地壳演化史的；既有理论探讨的，又有应用于找矿实际和成矿预测的，还有实验方法的。提出了不少新颖见解，绚丽多彩。它的出版必将为生产、教学、科研提供重要的参考，并为推动构造地球化学的进一步深入发展起到积极的作用。构造地球化学由于它与成矿学关系密切，其解决生产问题的作用明显，从而富有生命力，发展前景宽广。它的建立和发展凝聚了许多有关同志的智慧和心血，今后的进一步发展尤需广大地质工作者的支持和共同努力。笔者看到近年来各方学者的新成就，不胜高兴。当该文集付印之际，遵嘱写此数言，以志祝贺。

陈国达

1994. 7. 10

目 录

构造动力成矿作用机制的理论基础探讨·····	周济元 崔炳芳 (1)
断裂变质中力学—化学的耦合作用·····	孙 岩 戴春森等 (8)
构造化学与显微构造·····	段嘉瑞 何绍勋等 (14)
郟庐断裂南段桴槎山韧性剪切带构造岩应变强度与碱质浓度及液固比的关系 ·····	刘德良 王奎仁等 (19)
郟庐断裂带南段韧性剪切带糜棱岩化过程中体积亏损—流体渗滤—组分迁移 关系探讨·····	王奎仁 杨晓勇等 (24)
变形温度与元素迁移的关系·····	张翊钧 王惠初等 (33)
琼西金矿带构造地球化学特征及构造控矿机理模拟试验·····	吴学益 夏 勇等 (39)
形变在海南二甲金矿成矿作用中的构造地球化学实验研究·····	杨元根 (47)
云南广南木利层控锑矿床构造应力场控矿特征·····	孙家骢 王 忠 (54)
江西德兴斑岩铜矿床裂隙—脉系统形成的动力学·····	高合明 於崇文等 (65)
胶东玲珑—焦家式金矿床的构造物理化学成因研究·····	吕古贤 (71)
地洼沉积构造层的含金性与金矿寻找·····	黄瑞华 (85)
湖南水口山矿田金银铅锌铜多金属成矿的断裂动力地球化学 ·····	谭凯旋 刘顺生 (90)
塔斯特含金花岗岩断裂的地质地球化学特征·····	潘传楚 刘 翔 (97)
韧性剪切带大型金矿床某些构造地球化学特征·····	杨子江 (105)
辽宁四道沟韧—脆性剪切带地球化学特征·····	肖成信 (113)
德兴斑岩铜矿岩体侵入接触构造地球化学初探·····	黄方方 (120)
广东凡口超大型铅锌银矿床成矿断裂系统的地质地球化学特征 ·····	古菊云 朱 敏 (131)
相山火山岩成岩构造环境的地球化学判据·····	梁 良 刘成东等 (138)
千里山地区中生代地洼岩浆作用对内生成矿的构造地球化学影响·····	王伏泉 (147)
断裂构造地球化学与铀成矿·····	方适宜 李佑威等 (153)
应用构造地球化学法对陶村铁矿碳酸铁分布规律的研究·····	冯荣英 易武齐等 (159)
窑街煤田CO ₂ 突出的构造地球化学特征·····	陶明信等 (164)
滇西地震预报实验场水文地球化学背景与活动断裂的关系 ·····	李永强 杨杰英 (170)
编后记·····	(179)

CONTENTS

A Research into the Theoretical Base of Mineralization Mechanism of Tectonic Dynamic	Zhou Jiyuan Cui Binfang (7)
Mechano-Chemical Coupling in the Fracture Metamorphism	Sun Yan Dai Cunsen et al (13)
Tectonochemistry and Microstructures	Duan Jiarui He Shaoxun et al (18)
The Relationship Between Strain Strength and Alkali Concentration, Ratio of Liquid to solid in Fucha Mountains, Southern Segment of Tancheng-Lujiang Fracture Zone	Liu Deliang Wang Kuiren et al (23)
A study on the Relationships Between Volume Loss-Fluid Flow-Composition Change in the Process of Mylonitization in the Ductile Shear Zones: South Part of Tancheng-Lujiang Fracture Zone, Eastern China	Wang Kuiren Yang Xiaoyong et al (32)
The Relationship Between Deformation Temperature and Element Migration	Zhang Yijun Wang Huichu (38)
Tectono-Geochemical Characteristics of the Qiongxian Au Deposit Belt and the Modeling Experiment on the Deposit-Control-Mechanism of the Structure	Wu Xueyi Xia Yong et al (46)
The Significance of Deformation in Mineralization Deduced from Tectonogeochemical Experiments	Yang Yuangen (53)
Ore-Controlling Features of Structural Stress Field of Stratabound Antimony Deposit in Muli, Guangnan, Yunnan	Sun Jiacong Wang Zhong (64)
The Dynamics of Formation of the Fracture-Vein System in porphyry Copper Deposits, Dexing, Jiangxi Province	Gao Heming Yu Chongwen et al (70)
On the Tectonic Physicochemical Genesis of Linglong-Jiaojia Type Gold Deposits, Jiaodong Area, Shangdong	Lü Guxian (84)
Gold-bearing Quality of Diagenetic Structural Layer	Huang Ruihua (89)

Fracture-Dynamogeochemistry of Au Ag Pb Zn Cu Multi-metal Mineralization in shukoushan Ore Field, Hunan	Tan Kaixuan et al (96)
Geological and Tectonogeochemical Features of the Fault of Tast Gold-bearing Granite, Xinjiang, China	Pan Chuanchu Liu Qiang (104)
Structural Geochemistry Characters of Big Type Gold Deposit in Zones of Flexible Shear.....	Yang Zijiang (112)
The Geochemical Featuer of Sidaogou Ductile-Brittle Shear Zone, Liaoning Province.....	Xiao Chengxin (119)
A Study on the Tectonogeochemistry of the Intrusive Contact Structural Zone.....	Huang Fangfang (130)
Geological and Geochemical Characteristics of Ore-Forming Frac- ture System in the Fankou Super-large Lead-Zinc-Silver De- posit Guangdong Province.....	Gu Juyun and Zhu Min (137)
Geochemical Criteria of Tectonic Environment of Volcanic Rocks Formed in Xiang-shan.....	Liang Liang Liu Chengdong et al (146)
The Tectonogeochemical Influence of Mesozoic Magmatism on Endogenic Mineralization in the Qianli Mountain Area	Wang Fuquan (152)
Geochemistry of Fault Structures and Urantium Metallization	Fang Shiyi Li Youwei et al (158)
A Study of the Distribution Law of Iron Corbonate in Taocun Iron Ore by the Tectonogeochemistry Method	Feng Rongying Yi Wuqi et al (163)
Tectonogeochemical Characteristics of CO ₂ Outburst in Yaojie Coalfield.....	Tao Mingxin Xu Yongchang et al (169)
The Hydrogeochemical Background and Its Relation to the Ac- tive Faults in the Earthquake Study Area in Western Yun- nan.....	Li Yongqiang Yang Jieying (178)
Editor's Words	(179)

构造动力成矿作用机制的理论基础探讨

周济元 崔炳芳

(地矿部南京地质矿产研究所, 南京210016)

摘要 构造动力成矿作用机制主要依据构造动力这一机械能转化及守恒定律, 解决力学与物理学其他部分乃至化学相联系的重要成矿理论问题。构造动力作用于岩石, 在其内部产生应力和变形, 增加内能(包括弹性应变能、热能等)和质量, 并据岩层褶皱和断裂等不同变形过程中产生的能量估算, 其结果用以判别成矿过程中所需温度、压力等物理化学条件, 用高温高压实验加以检验, 与成矿实际机制对比。表明构造动力成矿作用机制的理论可以较好地解释该类矿床成矿作用机制及成因, 对找矿也有重要指导意义。

关键词 构造动力, 成矿作用机制, 能量理论

构造动力作用于岩石表现为一种机械能。而机械能转化及守恒定律则是解决动力学问题的第三个(牛顿第二定律、动量守恒定律)有力武器, 也是力学与物理学其他部分乃至化学相联系的重要桥梁。

一、构造动力成矿作用的能量理论

岩石遭受外力作用, 其内部就要产生应力。应力状态由体变(球)应力和形变(偏)应力组成, 即:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{pmatrix}$$

体变应力使岩石引起力学微扰, 增加内能; 形变应力使岩石产生变形。

根据弹性理论, 应力与内能的关系式为:

$$U = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \epsilon_{ij}$$

式中 U ——内能密度; σ_{ij} ——应力分量; ϵ_{ij} ——应变分量。

岩石是多粒子统计系统, 可以由相同的宏观参量来表征。一个系统在未受外力作用时, 条件参量的变化是无限缓慢、静态的、任何时候都处于统计平衡态。当该系统受外力作用, 其状态就要发生变化, 由状态1变到状态2, 并伴随一系列变化, 如粒子数、化学势、能量等。对封闭系统来说, 内能(U)增加等于系统周围对系统所作的功(W)和输入的热量(Q), 即:

$$U_2 - U_1 = W + Q \text{ 或 } \delta U = \delta W + \delta Q$$

对内能增量积分, 即:

$$U = \int (\delta W + \delta Q) dt$$

对开放系统来说, 内能增加除了系统周围对系统作的功和输入的热量外, 还要输入质量(m), 即:

$$U_2 - U_1 = W + Q + m \text{ 或 } \delta U = \delta W + \delta Q + \delta m$$

对内能增量积分，即：

$$U = \int (\delta W + \delta Q + \delta m) dt$$

分别得到封闭和开放系统内能的总积累值。这就是由于外界对系统产生的力学微扰（即体积改变所作的功）。但是，外参量对系统分布函数的作用是间接的，它仅仅使系统引起非平衡态，当去掉外力作用，系统就回到了平衡态。如果外力持续作用，则它对系统的分布函数就要产生直接影响，并导致系统能量变化。现设 $F_1(t) \cdots F_n(t)$ 为持续作用力，用哈密顿符号 H 描述能量状态，用刘维方程把引起的力学微扰表示为：

$$Ht = \frac{dH}{dt} = \frac{1}{i\hbar} (H + H' + H' t)$$

用格林函数表示为：

$$\frac{d}{dH}(H) = - \int_{-\infty}^{\infty} \langle H' t(t) H' (t)' \rangle dt' \text{ 或}$$

$$\frac{d}{d(H) i\hbar} = \sum_{i=1} (\alpha_i) F_i(t) = (\alpha) F(t)$$

式中 i ——复数虚部符号； F_i ——驱动力。量子跃迁理论采用傅里叶级数证明：

$$\frac{d(H)}{dt} \geq 0$$

这就表明：受微扰作用后系统的能量增加。

岩石中内能这个函数除了质量外，还表现为热能和功。功表现为弹性功（分子间相互作用的势能，宏观上表现为弹性应变能，并贮存于岩石中）和塑性功（外力作用引起岩石位移所作的功，按热功当量化为热能，分子热运动的平均动能在宏观上由热量来衡量）。将热力学定律应用于岩石变形体，可得出其能量定律：除质量外，岩石变形体内能的增量（ dU ）等于其变形能的增量（ dE ）和热能的增量（ dQ ）之和。据此可分别求得开放和封闭系统内能的增量：

$$dU_{\text{开}} = dE + dQ + dm$$

$$dU_{\text{封}} = dE + dQ$$

内能最终以弹性应变能和热能（开放系统还有物质变化）贮存于岩石中。而弹性应变能是有限的，它积累到一定程度（弹性极限）会发生塑性形变，则一部分转换成热量。因此，岩石随外部构造动力持续作用，最终表现为热能的不断增长（压力随之增加）。这就表明构造动力—应变能—热能间的内在联系和变化过程，并可通过计算外力所作的功和岩石中所贮存的变形能求得岩石系统具有的热能。

二、岩层变形过程中的能量估算

岩层的变形形式有褶皱和断裂。可分别计算它们在变形过程中的能量。

1. 岩层褶皱过程中的能量估算

当岩层遭受挤压、缩短产生褶皱，同时在岩层内部积累变形能。岩层中积累的应变能等于挤压力乘以岩层缩短的距离，即外力所作的功。虽然岩层随变形加剧，外力做功逐渐增加，但岩石的弹性应变能不能无限增加，到一定程度（弹性极限），弹性变形向塑性变形转化，

弹性应变能也逐渐转变为热能。可见，岩石所承受的弹性变形是那样的小，而构造动力作用过程中所产生的褶皱变形是那样的强烈，表明构造动力所作的功主要转变成了热能。据岳石（1987）对山东旧店矿区褶皱过程中能量的计算，约为 0.1725×10^{16} 尔格/厘米³。当然，内能在同一褶皱的不同部位或不同类型褶皱是不尽相同的。需要具体计算。

2. 岩层断裂过程中的能量估算

岩层断裂过程中的能量主要以二种形式释放：一是由岩层断裂所发生的振动，以弹性波能形式释放，同时也产生大量热量，以热能形式释放；二是由断层滑动所产生的摩擦，以热能形式释放。

断裂过程中的能量计算，涉及断裂的长度、深度、断距和间距。目前，断裂的长度和深度关系是根据地震学中震源的深度和长度关系推导，即：

$$M = 0.21 L^{0.31}$$

$$H = 1.9 L^{0.8}$$

$$A = 0.02 L^{0.39} \text{ 或 } 1.73 L^{0.507}$$

式中 L ——断层长度； M ——断层间距； A ——断距； H ——断层深度。断裂释放的弹性波能计算，目前根据地震学中有关数据推导：

$$E = 10^{17.2} l^3$$

式中 E ——地震波能（单位：尔格）。断层滑动摩擦生热，既可由岩石弹性应变能转化而来，也可由外力推动岩块滑动而作功。其热能值为：

$$W = \sigma_f \bar{D} S$$

式中 σ_f ——断面单位面积上的摩擦力； $\bar{D}$ ——断层平均滑距； S ——断面面积（ $=L \times H$ ）。

断裂系统的这两种能量，除了很少一部分弹性波能以声、光、辐射能形式释放于岩石体系之外，其余能量均转化为热能，并贮存于岩石中。如果其5%为弹性波能以声、光、辐射能形式释放，其余（ $E \times 95\% + W \times 100\%$ 尔格）的能量转化为热能。根据柯普定律和岩石热容比，若按每克岩石升高1°需要X卡热量，1 m³岩石需要Y卡热量。那么，上述热量可使V m³岩石升高T度。构造动力长期持续作用，将导致断裂近旁岩石升高达一定温度，即一个系统的能量（ E ）也是系统的状态函数。能量的增量等于变化过程中外界对系统所作的功或等值功（如热折合为相当的功），即：

$$E_2 - E_1 = W$$

若 $W = 0$ ，则

$$E_2 = E_1$$

表明，若系统与外界无功及热交换，则其能量在内部相互转化，总能量保持不变。这就是能量转化及守恒定律。

3. 矿物晶格位错能量的估算

在矿物晶格的理想点阵中，所有原子都位于平衡位置上。当其遭受应力作用，原子将略微离开其平衡位置，产生应变和弹性应变能（ $dE = Fdl$ ， E —应变能， F —作用力， l ——长度）。

一个位错的能量可分为： $E = E_{\text{中心}} + E_{\text{应变}}$ 。 $E_{\text{中心}}$ ——中心区域能量，是指位移量太大以

致虎克定律不能适用的区域能量)。而应变能对不同类型的位错是不同的,即 $(\frac{E}{L})_{\text{螺型}} = \frac{Gb^2}{4\pi} \ln \frac{r}{r_0} +$

$$(\frac{E}{L})_{\text{中心}} \text{ 和 } (\frac{E}{L})_{\text{刃型}} = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\gamma)} \ln \frac{r}{r_0} + (\frac{E}{L})_{\text{中心}}。 \text{ 式中 } E \text{——应变能; } L \text{——长度; } G \text{——}$$

剪切模量; b ——位移(柏氏矢量); r ——圆柱体半径; r_0 ——取的小半径; γ ——泊桑比。

可见,位错应变能与 $\ln r$ 成正比,随 r 增加而缓慢增加,为长程应变场。中心区域能量估算,当 $r > 10^{-4}$ 厘米时,为上二式算得总能量的 $1/5$ 。应变能与柏氏矢量的平方成正比。因此,晶体中的稳定位错是具有最小柏氏矢量的位错,这些位错的应变能也最低。位错的能量是按单位长度计算的,与表面能相似,称为线能,故两点间的直线位错比曲线位错的能量要小,直线位错较为稳定。

三、构造动力的成矿作用

构造动力成矿作用过程是能量积累、转化和释放过程。在这个过程中,引起岩石和矿物析水,激发元素活化、迁移、温度、压力升高,驱动矿液运移,产生成矿空间和物理化学条件变化等。

1. 构造动力析水

是指构造动力作用过程中所波及的岩石、矿物中排析水分的现象。其水的种类随岩石类型有别:与沉积岩、岩浆岩和变质岩有关的海、河、湖水,岩浆水和变质水(结晶水、化学结合水或晶格水),还有天水、地下水等叠加。如果上述不同类型岩石同时存在,其析出水,加上天水、地下水混合,则构成特殊混合水。所谓水的多来源,仅仅与构造带出现的岩石类型有关。其含水量差别很大,可据实测数据加以计算。同时,因其是在构造动力作用过程中析水,与其波及岩石进行同位素交换,其组成主要受原岩同位素组成、温压、原始流体的同位素组成所控制,其值变化大。如广西金牙、高龙和浪金等金矿床的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-30.942 \sim -105.34\%$; $\delta^{18}\text{O}$ 为 $7.86 \sim 25.83\%$ 。利用相应样品测温资料,根据方解石—水和石英—水之间氧同位素分馏方程(Thompson, 1976和Mastuhia等, 1979)换算流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $-4.3 \sim 15.971\%$ 。在 $\delta^{18}\text{O} - \delta\text{D}$ 图上投点分散:浪金矿床离雨水线最近,其次为高龙矿床,金牙矿床较远,距粘土矿物(高岭石)线较近。这就不能用氧漂移和简单多来源解释。金矿床岩层富含羟基的粘土矿物(占全岩的 $33 \sim 34\%$),其中中三叠统百蓬组泥灰岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $13.08 \sim 22.85\%$,与粘土矿物为主的沙泥岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 $12 \sim 20\%$ 相近。经计算,介质 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $-4.3 \sim 15.977\%$,其中 $2/3$ 以上数据接近或大于 10% ,与百蓬组砂泥岩的氧同位素组成相近。表明成矿介质以地层封存水和矿物结晶(变质)水为主,尤其后者,并与不同比例的下渗天水混合,导致不同金矿床成矿介质的差别,构成不同的特殊混合水。这是构造动力析水的最大特点。其水量可据析水标志算得。

2. 构造动力增压升温

构造动力作用于岩层引起变形、破裂及位移,体变分量产生力学微扰,增加内能转化的热能和断层位错摩擦生热,使温度升高、压力增大,岩石矿物溶解、熔融(岩石初始熔融温度为 650°C),溶液升温成为热液。广西金牙金矿床成矿断裂带中有破裂岩、角砾岩和碎裂岩等脆性变形,有构造透镜体、劈理、片理、糜棱岩、石英的变形纹、波状消光等韧性变形和

丝状脉（高岭石、绢云母、绿泥石），云雾状石英脉，压溶缝合线、重结晶，交代、硅化和压力影，压溶、溶蚀黄铁矿、毒砂及大量玻化岩等粘性流动。与矿石高温高压实验的变形、破裂、溶解、熔融及反映析水的石英、方解石和玻化岩脉等相似。表明是在构造动力作用过程中升温增压所产生。如果有其它热源叠加，则温度、压力将会更高。

3. 构造动力激发元素活化、迁移

构造动力作用于矿物组成的岩石，引起其内部变形、破裂，产生应力场和应变能，当其超过原子或分子的结合能和晶格能时，原子或分子受激活化、迁移：大多进入析出的水溶液中，呈络合物或离子状态随其运移；部分呈原子或分子扩散，例如棱位错上、下部质点密度不同，在质点密度大的压应力区倾向吸引半径较小的杂质原子，而在质点密度小的张应力区则倾向吸引半径较大的杂质原子，而且随杂质原子半径差增大，上述作用也愈大，以缓和晶界上形成的局部应力状态；或呈溶解和熔融状态流动。元素受激活化、迁移可据矿体、赋矿岩层与区域背景值，轻、重稀土，S、O、C、Pb、Sr等同位素含量及其变化进行追索。Au一般富集在断裂带两侧的破裂岩、角砾岩、碎裂岩带，而其中心的劈理片理、糜棱岩带较贫或无矿化；稀土和同位素组成有随远离断裂带重者增高趋势。表明构造动力激发元素活化、迁移与其强度有关，与岩浆热液等有关成矿元素、稀土和同位素等含量及其变化特点有明显差别。

4. 构造动力驱动矿液运移

矿液或矿浆运移，除了热力作用外，主要受动力驱动，一般由高压、高能量、高温度和高浓度部位向低压、低能量、低温度和低浓度部位运移，并在适宜部位汇聚或流体压力扩容。其运移或流动方向可据矿液运移标志、温度场、浓度场的测量，构造应力场、能量场的计算机模拟等追索矿液运移路径及汇聚、停积场所，并结合物、化探和遥感等资料，经计算机综合判别，预测隐伏矿体、矿床和矿田。作者等（1983、1988）在浙江省建德铜矿预测并找到新的隐伏矿体，延长了矿山寿命，余祖成（1987）在四川会理拉拉厂铜矿用中心差异向量法预测并找到中型铜矿等。

5. 构造动力影响矿质沉淀的物理化学条件

矿质沉淀成矿，一般是决定于矿液或矿浆所处的温度、压力、pH、Eh和逸度等物化条件而变化的。而这些条件及其变化又是与构造动力及其变化密切相关的。在构造动力驱动下，当矿液（由下而上或由中心向两端或侧）运移至一定部位过程中，如果温度、压力骤降，pH、Eh和逸度等也随之变化，矿液中的矿质便结晶析出，渐渐沉淀聚集成矿。

6. 构造空间控矿

构造动力作用于岩层（体）就要发生变形和断裂，构成一定规律展布的构造体系。与成矿作用同时产生或活动的称为成矿构造应力场或成矿构造体系。构造动力引起岩层（体）析水、增压升温、元素活化、矿液运移、矿质沉淀或矿体定位。在高压、高能量、高温、高浓度部位发生岩层（体）析水、增压升温、元素活化；元素、矿液由高向低压、低能量、低温、低浓度部位进行迁移；矿液汇聚、矿质沉淀、矿体定位则是由高包围的低压、低能量、低温、低浓度部位（张裂、位移空间、扩容带、水压致裂等）或其过渡带产生的。不同成矿作用在空间分布是有规律的，这种规律性是受构造或构造体系控制的，称为构造空间控矿作用。可通过直接调查和填（编）图获得，如构造或构造体系控矿的方向性、分带性、

部位性、等距性、等距递变性、递变性和对称性，以及构造形迹及其力学性质、不同级序构造、构造体系规律及其复合等控矿；同时，构造形迹变化与矿体、矿床分布关系，如断面波状或折线状趋势分析、构造岩分带等空间变化规律与矿体厚薄、品位贫富变化的研究，可揭示矿体的空间分布规律，并用于成矿预测，如四川松潘东北寨微细浸染型金矿床矿体分布在跨石崖断裂面下凹部位，呈一定规律分布，据此预测该矿床矿体所在部位，布钻验证，一一命中，加速了勘探进程，探明金储量100吨以上，取得了极好成效。

参考文献

- 〔1〕周济元、崔炳芳、陆彦，1991，广西金牙金矿床构造动力成矿高温高压实验及其研究意义，《矿物岩石》，vol.11，No3
- 〔2〕浙江大学、武汉建筑材料工业学院等，1981，《硅酸盐物理化学》，中国建筑工业出版社。
- 〔3〕Zhou Jiyuan and YuZucheng, Tectonic stree, element activation and mineralization theory and Its significance to research, Progress in Geosciences of China (1985—1988). Papers to 28th IGC, vol.1, Beijing, China, Geological Publishing House, Beijing, China, 1989.
- 〔4〕Guy A. G., J. J. Hren, 1974, Elements of Physical Metallurgy, 徐纪楠主译，1984，机械工业出版社。
- 〔5〕Волярович М. П. 等，1977，Исследования фзических СВойств Минерального Вещества Земли при Высоких тер-Модинамических Параметрах，蒋风亮、于允生译，1982，地震出版社。
- 〔6〕周济元，1989，《地质力学引论》，成都科技大学出版。

A RESEARCH INTO THE THEORETICAL BASE OF MINERALIZATION MECHANISM OF TECTONIC DYNAMIC

Zhou Jiuyan Cui Binfang

(Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources of CAGS, Nanjing, 210016)

Abstract The mineralization mechanism of tectonic dynamic, which is mainly based on the law of transformation and conservation of mechanical energy, deals with some important problems of mineralization theory in relation to the connection between mechanics and other subjects in physics, as well as chemistry. The tectonic dynamic exerting on rocks brings about stress and deformation within them and increases internal energy (including elastic strain energy, thermal energy, etc) and mass. The energy induced by different deformation processes such as folding and faulting of rock could be estimated, which can be used for determining the physical and chemical conditions such as temperature, pressure, etc needed during the mineralization process, tested by high temperature and high pressure experiment, and compared with the practical mineralization mechanism. The research indicates that the basic theory of mineralization controlled by tectonic dynamic can properly explain the mineralization mechanism and genesis of this type of ore deposit, and it is also of important significance in ore-prospecting.

Key words tectonic dynamic, mineralization mechanism, energy theory

断裂变质中力学—化学的耦合作用

孙 岩 戴春森 陈祥云

(南京大学地球科学系, 210008)

摘要 断裂变质岩的分带结构是非平衡态下的有序结构, 这种分线形理论分析自八十年代起已逐步被引用到构造地质研究中。非平衡态下断裂变质成岩成矿过程中力学—化学的耦合作用, 反映变形受力的岩石会自发地卷入提高自身结构变化。以中扬子区凤凰山、白象山铁矿的宏观观察和微观分析资料为例, 简要探讨了层滑断裂带中力学—化学耦合的自组织作用, 并指出区域上地层—断层—矿层的一致性可以作为重要的找矿标志。

关键词 非平衡态, 断裂变质, 力学—化学耦合作用, 有序结构, 自组织作用

六十年代莫柱孙等提出了断裂变质作用 (fracture metamorphism) (莫柱孙, 1964)^①, 使之对压碎或碎裂变质作用 (cataclastic metamorphism) 有了新的认识。七十年代随着韧性剪切带研究的兴起, 对断裂变质成岩成矿过程的了解又进了一步。直至八十年代初非线性 (nonlinear) 理论, 耗散结构 (dissipative structure) 理论的自组织 (self-organization)、自反馈 (self-feedback)、自相似 (self-similar) 以及力学—化学的耦合作用 (mechano-chemical coupling) 等原理被引进到地质地球化学的研究中, 更进一步地揭示了其断裂与变质作用间的内在联系和成因机制 (P. Ortoleva, E. Merino et al., 1982^[1]; P. Ortoleva, J. Chadam et al., 1987^[2]; T. Dewers, et al., 1990^[3]; 孙岩等, 1984, 1987, 1992^[4, 5, 6])。

一、断裂变质岩的分带结构

断裂变质岩的分带结构是非平衡态下的有序结构, 通常把平衡态下的稳定自序结构称谓平衡结构; 耗散状态下的稳定化有序结构称谓耗散结构。I. Prigogine 的布鲁塞尔学派从对热力学第二定律的分析中看出, 高熵是对应于无序化的增加, 而低熵则对应于有序化的增大。若是将平衡态对应无序, 则非平衡就是有序的起源, 即“非平衡态是有序之源”(I. Prigogine, 1978)。

热力学第二定律说明了一个物体的内能不能完全地转变为功, 相反地功却完全地转变为一个物体的内能。因此功转化为一个物体的内能这个过程带有单向性, 是不可逆的。在自然界中存在着大量的不可逆现象。不可逆的原因是一个系统内部一旦具备了温度不均匀、压强不均匀和浓度不均匀等这些初始条件, 它本身就处于非平衡态。同样, 这些状态的演化也不能完全决定于外界条件, 它们还决定于内参量的分布状况。

①莫柱孙, 1964, 论断裂变质作用, 广东省地质矿产局, 第1—10页。

在不可逆过程中, 系统处于非平衡态, 对这种状态的描述可把系统所在空间划分为若干微分部分, 并假设每个微分部分物性是均匀的; 微分部分弛豫时间 τ 比整个系统弛豫时间 T 小得多; 整个系统的内能、熵相加等于各个微分部分相应量总和。故在 Δt ($\tau \ll \Delta t \ll T$) 内其微分部分局部平衡, 并且其变化可视为可逆的, 是准静态的。这样对每个微分部分的熵密度 S 、内能密度 u 和粒子数密度 n 的变化满足可逆微变化的表示式

$$Tds = du - \mu dn - dw' \quad (1)$$

此处 dw' 为非膨胀功, 并且整个系统的熵(S)和内能(U)等于每个微小部分的和

$$S = \int s d\tau \quad U = \int \mu d\tau \quad (2)$$

此处 $d\tau$ 为体积元, 考虑各个量的时间变率, 实际上是满足条件

$$\tau \ll \Delta t \ll T \quad (3)$$

的 Δt 中的平均变率, 即把一个量的时间导数 $\partial s / \partial t$ 理解为是 $\Delta s / \Delta t$, 于是由(1)式可得

$$T \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial t} - \mu \frac{\partial n}{\partial t} - \frac{\partial w'}{\partial t} \quad (4)$$

这样(4)式就是联系各个量的变率之间的基本方程(龚昌德, 1982)^[8]。

不可逆过程是客观存在的, 在许多运动现象中, 不可逆过程是起着基本的建设性的作用。同时人们也正在探求将不可逆性和动力学的可逆性定律统一起来, 这样便可将后者纳入一种更为广泛的体系之中, 得出超出I. Newton的经典力学和M. Planck的量子力学的微观表述。不难看出, 建立在热力学第二定律基础之上的远离平衡态的不可逆过程, 即作为有序之源的非平衡系统演化过程的研究, 是把物理学和其他科学从强调讨论、查考历史中统一起来, 是把非线性科学的研讨推进到一个崭新的阶段。

二、变形岩石中力学—化学的耦合作用

力学—化学的耦合作用 (mechano-chemical coupling), 它不是一个新的概念, H. C. sorby (1853, 1863)^[9]在研究板劈理 (slaty cleavage) 的起源和压力在矿物反应 (mineral reaction) 中的影响论述里就已涉及到了。特别是到了本世纪八十年代F. K. lehner, J. Bataille (1985)^[10]把弹性应变能, W. Bosworth (1981)把位错应变能 (dislocation strain energy)^[11], S. Brantly, D. Crerar (1984)和T. Dewar, P. Ortoleva (1989)把表面或界面能 (surface or interfacial energies)等的研究同力学—化学耦合作用联系起来, 使其研讨耦合作用的微观机制更加深入^[12]。在此期间P. Ortoleva (1982)首次提出变形岩石中力学—化学耦合的自组织作用 (mechano-chemical self-Organization)^[13]。事实上G. De Vore (1969)、P. R. Cobbold (1977)、P. Y. F. Robin (1978)、R. Fletcher (1982)等在描述矿物优选分布、带状变形构造、颗粒接触间的压溶以及岩石变形和物质扩散等现象时, 已经间接提到过这种自组织作用 (A. W. Thomas, 1990)^[13]。

所谓自组织作用, 按照T. Dewers和P. Ortoleva (1990)的定义是: 通过某些扰动反馈机制型式 (type of destabilizing feedback mechanism), 包括一级相的跃迁 (transition) (例如矿物颗粒和流体间的反应) 和输运 (transport) (例如对流和扩散), 变形受力的岩石会自发地卷入提高自身结构的变化 (enhancement of textural perturbations)。一个简单的例子是矿物的自反馈模式 (mode feedback), 包括岩石中微小体积单元的矿物