

成矿过程水岩反应研究态势

高帮飞^{1,2}, 邓 军^{1,2}, 王庆飞^{1,2}, 杨立强^{1,2}, 万 丽³

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国地质大学“岩石圈构造、深部过程及探测技术”教育部重点实验室, 北京 100083;

3. 广州大学 数学与信息科学学院, 广州 510006)

摘 要: 水岩反应是矿床学的重要研究内容, 亦是地球科学领域的前沿问题。复杂性理论、渗流力学等的引入和测试技术的提高, 促使水岩反应研究向系统化和定量化的方向发展, 并取得了诸多相关进展。通过水岩反应中元素迁移过程和机制的探索, 可以进行流体示踪及推测相关水岩反应过程; 定量计算、物理实验和数值模拟是水岩反应研究的主要手段; 对复杂的水岩反应体系, 应综合运用各种方法, 以更加真实地重塑水岩反应的过程。

关键词: 水岩反应; 动力学; 定量计算; 物理实验; 数值模拟

中图分类号: P611; P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2007)01-0013-05

0 引言

近 20 年来, 水岩反应已成为地球科学领域前沿问题^[1-3]。水岩反应研究涉及地球中流体的起源、水质时空分布规律及其影响因素、地球中流体的地球化学演化, 分析不同条件下水岩反应的地球化学特征、过程动力学及其地质效应(如成岩、成矿、成油)、环境效应(加剧或减轻污染)^[4]。金属成矿的实质是岩石中原始分散元素, 借助多种水岩反应在成矿流体中逐渐浓集, 在适当部位沉淀形成矿石的全过程^[5]。故元素既是基本成矿要素, 又是成矿作用(元素萃取、输运、沉淀)过程的示踪剂。因此, 通过对水岩反应中元素迁移过程和机制的探索, 可以推测相关成矿中的水岩反应过程。对于复杂的水岩反应体系, 应在准确把握地质资料的基础上, 综合运用定量计算、数值模拟和物理实验方法, 更为真实地重塑水岩反应的过程。

1 水岩反应的相关理论与技术进展

水岩反应体系是有着复杂系统组成、时空演化

及耦合作用的动力学系统^[6], 相关理论的发展使系统研究不同对象(多水-多岩石组成)、不同条件(封闭/开放体系、平衡/非平衡态)、不同尺度(微观/宏观)的水岩反应过程成为可能。复杂性理论引入为探讨水岩反应在非平衡态和非线性条件下的物质运动创造了条件; 渗流力学等在水岩反应研究中的应用则沟通了岩石变形、流体输运与水岩反应物质(元素)迁移, 促使了水岩反应-流体输运-力学耦合动力学的兴起。此外, 表面物理学引进地学, 改变了传统的单矿物溶解度、元素迁移研究模式而向水/岩界面反应研究发展。提出矿物溶解不仅是扩散控制, 更是一种被矿物表面反应控制的过程^[7]。因此, 近年来成矿地球化学实验也更多地关注矿物界面反应过程中所进行的化学反应, 并从分子、原子水平上深入讨论成矿过程的反应机理^[8]。

水岩反应研究, 根据理论基础和研究内容的不同, 可以从质量平衡、热力学以及动力学三方面进行。

2 质量平衡

开放体系水岩反应存在组分的带入带出, 岩石

常发生质量和体积变化,形成蚀变。通过蚀变岩石的研究可提供有关元素迁移、活动性及水岩反应过程的信息。

因存在闭合问题(定和约束)^[9],不能直接比较开放体系蚀变前后岩石化学成分相对变化,而需要进行质量平衡计算。Gresen^[10]最早建立了包含主要氧化物含量和岩石比重两个变量著名的 Gresen 质量平衡方程(方程 1),以估计水岩蚀变过程中质量和体积变化,该方法一直延续至今并不断发展。

$$T_i = M_{id} - M_{ip} = M_p [F_v \cdot w_{id} \cdot (\rho_i / \rho_p) - w_{ip}] \quad (1)$$

式中, T_i 为成分 i 在岩石蚀变前后迁入或迁出的量; M_{ip} , M_{id} 为成分 i 在原岩与蚀变岩中的总质量; M_p 为原岩总质量; F_v 为体积因子,即蚀变岩与原岩体积的比值; w_{ip} , w_{id} 为成分 i 在原岩与蚀变岩中所占比例(即质量分数),直接用化学分析结果; ρ_p , ρ_i 分别为原岩、蚀变岩的密度。

Grant^[11]以此为基础推导了质量平衡的“等浓度线”方程(方程 2):

$$w_{ip} = (M_{id} / M_{ip}) w_{id} - T_i / M_{ip} \quad (2)$$

OHara^[12]给出了岩石成分所致体积变化公式, Brimhall^[13]导出了以不活动元素为参考物种的质量变化和体积变化表达式。这些计算都存在一个基本假定,即已知岩石质量变化前后的体积变化,或者岩石在质量变化中存在一个以上不活动元素。由于反应前后岩石体积变化难以定量研究,多数学者选择不活动元素进行计算。常用评估及选择不活动元素的方法有:相关分析法^[14]、 $\Delta X - f$ 图解^[11]、元素-元素图解^[15]、 $C_i^A / C_i^0 - C_j^A / C_j^0$ 图解^[16]等。

水岩体系蚀变岩石质量平衡计算广泛应用于成矿作用各领域,以获得相关成矿作用信息:①判断流体性质和来源,魏俊浩等^[17]研究热液型金矿床围岩蚀变发现亲硫成矿元素和 Cr, Co, Ni 等元素不同程度富集,认为蚀变热液是一种来自深部的携带亲硫元素富硅碱性流体;②揭示特定成矿作用过程中元素的活动性,凌其聪等^[18]研究层控夕卡岩型矿床质量迁移发现,带入组分由强到弱为 $\text{Cr} \rightarrow \text{Ta} \rightarrow \text{Sn} \rightarrow \text{Th}$, 迁出序列由强至弱为: $\text{U} \rightarrow \text{Sb} \rightarrow \text{Ni} \rightarrow \text{Sr} \rightarrow \text{Ba} \rightarrow \text{Rb} \rightarrow \text{Co} \rightarrow \text{W}$;③反映元素迁移与矿化富集的关系, Pasi^[19]研究西澳 Bulletin 脉状金矿床蚀变过程的质量迁移表明,发生富集的 Ag, As, Au, Ba, CO_2 , K, Rb, S, Sb, Te, W 都与矿化有关,因而利用 As, Sb, Te, W 异常和钾化信息能很好地指示大型成矿远景区; Ozcan 等^[20]研究内华达州 Gold Bar 地区卡林型

金矿床质量迁移时发现,脱钙作用导致了蚀变岩石 44%~51% 的质量带出,矿化元素 Au, Hg, Zn, Sb, As 和有机碳大量富集;④研究构造对成矿控制作用,钟增球^[21]发现剪切作用过程中岩石体积亏损高达 28%,由 SiO_2 亏损量算得水/岩比值为 42~550,反映剪切作用过程中大量渗透流体加入影响着剪切带的流变行为和成矿作用;而孙晓明等^[22]的研究则表明夹皮沟金矿带韧性构造变形为近等体积变形($F_v \approx 1$),剪切作用导致 SiO_2 带出以及成矿物质富集。

3 热力学及热动力学

水岩反应热力学研究是结合热力学平衡约束和质量平衡约束,以真实再现水岩体系所经历的复杂化学反应。它通过一系列平衡相图来描述成矿系统流体和矿物的状态,能较好地刻画不同组分的稳定性关系,用以推断地球化学过程的反应进行的可能性、方向和限度^[23]。由于接近真实情况的相似模型难以构建,而且还需要考虑热力学数据资料的适用范围,一般而言,实际运用物理实验和数值模拟进行水岩反应热力学研究时都隐含或明示着有以下两点假设和简化:①水岩系统为封闭体系;②水岩反应的每个阶段体系总达到反应平衡,系统各处组分均一。

(1) 物理实验。前人开展了很多高温高压条件下实验模拟。实验表明, $T = 500 \sim 550^\circ\text{C}$, $P \gg 0.6 \text{ GPa}$ 条件下,达到矿物-流体平衡后流体 La/Sm 比值会比共存的萤石高 3 倍到十几倍^[24];刘玉山等^[25]进行了 250~500 $^\circ\text{C}$, 100 MPa 条件下海水-玄武岩反应和金属淋滤实验,结果表明,重金属淋滤量受温度和水/岩比值控制,在 450 $^\circ\text{C}$ 和 $w/r < 5$ 时,水岩反应生成溶液在 Fe, Mn, Cu, Zn 含量和酸碱度上均与现代海底矿化热泉相似。相比而言,低温低压水岩反应实验难度较大,一是实验持续时间长,二是流体物质组分变化很少;但随着 ICP-AES, AAS, ICP-MS 等高精度分析测试技术的发展,可以获得流体中阴阳离子的精确数据,使实验成为可能。如党志等^[26]研究常温常压封闭体系条件下水-玄武岩反应,发现硅的出溶速率很高,元素活动性由强到弱为 $\text{Na} \approx \text{Si} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Fe} > \text{Mg}$ 。

(2) 数值模拟。Heinrich 等^[27]根据水岩反应的几何结构特征提出反应模型(reaction model)的概念,并将其分为 3 类:①无空间维的反应模型——

“滴定计算”; ②一维流动路径模型; ③未完善的通道化流体流动和二维反应模型。3 类模型在成矿作用模拟中有着较好的应用, 其中“滴定计算”模型应用最广, 如沉积岩容矿贱金属矿床的形成、不同来源流体混合造成的矿质沉淀模拟; 夏林等^[28]据 Reed 等^[29]建立的“滴定计算”模型, 对铜山口铜(钼)矿床水岩反应金属析出、沉淀过程进行了数值模拟, 结果显示水岩反应过程中流体 Ca^{2+} , Mg^{2+} 大量增加, 且 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$; Giovanni 等^[30]认为过碱性火山岩地区地热流体亏损 Ca, Mg, 富集 K, Rb, Cs 和 F, 是海水与粗面岩反应的结果, 数值模拟表明, 海水曾与地下水、火山喷气不同程度地混合, 水岩反应后流体达到饱和状态, 生成热液蚀变矿物。通过一维反应模型可成功地描述由越过蚀变前锋流体驱动的矿石沉淀系统, 如个旧锡矿床的矿化分带^[31]、地下水淋滤形成的斑岩铜矿次生富集带^[32]研究。未完善的通道化流体流动和二维反应模型则成功应用于澳大利亚西部 Kalgoorlie 太古宙 Mount Charlotte 矿床金和钨沉淀的研究中^[27]。

然而, 经典热力学只探讨平衡态时物质体系的宏观性质, 而热动力学可以研究非平衡态、不可逆过程和自组织现象, 是当前理论地球化学的发展趋势^[23]。热动力学可以揭示水岩反应过程的现实性和进行的速度。尤其是表面物理学的引入, 使得开放体系矿物非平衡态、非线性溶解、速率、反应路径等问题迎刃而解。如吴大清^[33]通过反应速率和质量平衡分析表明, 较高的淌度和快速表面交换作用造成的溶液中氢离子浓度局域性“亏损”是造成金属离子水解沉淀的主要原因; 谭凯旋^[34]通过 NaCl 溶液中辉铜矿、黄铜矿和斑铜矿的溶解动力学研究, 对矿床空间上形成辉铜矿带-黄铜矿和斑铜矿混合带的矿物分带现象进行了解释; 张生^[35]发现在远平衡条件下, 方铅矿的溶解速率与氢离子活度呈线性关系, 溶解反应为一级, 且方铅矿的溶解机理为表面化学反应, 速率决定步骤为表面配合物的离解。

4 耦合动力学

水岩体系的复杂性不单是多物质组成和时空演化的不可逆性, 更体现在岩石变形、流体输运、热流与化学反应之间的耦合作用^[36-39]。如构造变形影响岩石孔隙率和渗透率, 断裂破碎有利于流体输运。而流体运动可导致变形构造的新生与转化; 流体还

可以通过水解弱化、降低矿物颗粒间摩擦系数等物理变化或者化学反应, 对岩石的变形过程进行控制, 影响甚至改变了岩石的变形机制^[40]; 水岩反应中矿物的溶解和沉淀引起流体成分的变化亦可影响岩石物性^[41]; 原生矿物的溶解则会加强孔隙连通性和增加渗透率^[42]。

於崇文^[7]将水岩体系的复杂耦合动力学分为反应-输运耦合动力学、断裂-多孔介质中的化学反应——复杂流体动力学、力学-化学耦合动力学等来研究; 邓吉牛^[43]探讨了物理化学转变和流体运动之间相互耦合的物理化学流体动力学; 谭凯旋^[44]注意到水岩反应(矿物溶解、质量迁移)同各种输运过程(如流体流动、能量输运、动量传递等)和力学过程(如应力、应变和构造变形)存在复杂的耦合与反馈作用, 提出用反应-输运-力学(Reaction-Transport-Mechanical, RTM)耦合动力学来描述水岩体系各种物理-化学耦合作用, 极大丰富了水岩反应耦合动力学的内涵。RTM 涉及化学、构造物理化学、渗流力学、水文地质学、热(力)学等多个领域, 水岩反应也由物理、化学转变、输运、流变和断裂等多种不同性质的过程所组成, 它们在总体上属于不可逆过程, 并且普遍具有非线性的动力学机制, 因而复杂性理论引入, 为建立反应-输运-力学模型、探讨水岩反应的复杂动力学过程创造了条件。

尽管针对不同研究对象和某些具体问题时可以建立不同的动力学方程, 但单一流体在多孔介质中的输运数学模型还是要遵循质量守恒、动量和能量守恒定律来建立。如 Cline 等^[45]提出了浅成热液金矿床中沸腾作用引起的流体流动-硅质输运-矿质沉淀的数学模型; Cox 等^[46]研究了变形变质作用过程中中温热液脉金矿矿质输运-沉淀模型; Bowers^[47]提出了由压力引起的金及其他金属元素输运-沉淀模式。

前人开展了诸多关于 RTM 耦合动力学的研究: 邓军^[48]系统研究了剪切带构造-流体系统 RTM 过程; 郭国章等^[49]按照质量、动量和能量守恒定律建立描述成矿运移过程的控制微分方程组, 运用有限元方法求解, 得到有关成矿流体运移的流函数和温度分布; Steefel 和 Lichtner^[50]用伴随着混合平衡和动力反应的多成分反应输运模型来分析离散断裂矩阵系统中蚀变带前锋的几何形态; Zhu^[51]和 Yang^[52]分别利用离散元程序和有限元法模拟流体在断裂和均匀介质中的输运。曹正林等^[53]进行了风化壳水岩反应动力学模拟研究, 模拟结果表明, 在构造条件可以限定的情况下, 水岩反应基本控制了

孔隙度的演化与分布。

5 方法讨论

定量计算应用的优点在于: ①只考虑水岩反应始态和终态而忽略中间过程, 使问题得以简化; ②可以通过蚀变岩石质量平衡计算研究开放体系水岩反应的元素迁移; ③可以研究构造作用过程中元素的迁移, 如剪切蚀变过程中的组分变化, 为研究构造成矿作用提供重要信息。同时值得注意的是, 要将蚀变过程中元素迁移同元素地球化学性质、蚀变矿物组合联系起来, 才能提供更多的成矿信息。另外, 由于忽略了中间过程, 很难反映水岩反应过程的细节, 属于定性、半定量研究, 其研究结论也不易被同类研究所借鉴。

物理实验旨在逼近真实模型, 但因实验条件的特殊和时间的有限, 即使很小的温度压力区间内, 也只在有限的几个系统中获得了某些确定的特性(如 $p-v-T$), 大大制约了实验研究的发展。目前仅以封闭体系、平衡态条件下, 高温高压淋滤、矿物溶解、沉淀实验为主, 对开放体系和非平衡态实验研究以及常温常压条件下的物理实验开展较少。同时 RTM 耦合动力学实验尚未开始。

数值模拟可以克服实验室模拟和理论模拟方法的缺陷, 进行各种困难条件下的实验工作。如利用分子动力学和蒙特卡罗法模拟如深部地幔这样极端条件下的输运和热力学性质, 并能提供流体的微观性质和结构信息^[54]。主要研究领域是模拟程序建设, 其核心问题在于: ①热力学数据库的建立, 利用半经验模式可以预测实验资料范围以外的热力学性质, 以满足数值模拟的需要; ②动力学模型的建立和参量的选取。动力学模型仍以质量作用定律、质量守恒定律、电荷平衡定律为基础, 一般需要引入描述动力学过程的变量。如考虑了介质孔隙度和结构变化随时间变化的 WRI-TEQ^[55], lattice BGK^[56] 程序。随着水岩反应理论的发展及动力学模型的完善, 模拟程序也要进行相应的发展或新模块的开发, 多场耦合模拟是水岩反应程序发展方向。定量模拟的不足之处在于, 难以把握成矿期介质渗透率及成矿应力场的动态变化, 造成其与实际地质对象在物理性质上仍具有一定差距。

对于复杂的水岩反应体系, 应在准确把握地质资料的基础上, 引入复杂性理论、渗流力学、表面物

理学等相关理论, 综合运用定量计算、数值模拟和物理实验方法, 才能更加真实地重塑水岩反应的过程。

参考文献:

- [1] Lasaga A C, Rye D M. Fluid flow and chemical reaction kinetics in metamorphic systems [J]. *America Journal of Science*, 1993, 293: 361-404.
- [2] 翟裕生. 关于构造-流体-成矿作用研究的几个问题[J]. *地质前缘*, 1996, 3(3-4): 230-236.
- [3] 张枝焕, 常象春, 曾溅辉. 水-岩相互作用研究及其在石油地质中的应用[J]. *地质科技情报*, 1998, 17(3): 69-74.
- [4] 沈照理, 王焰新. 水-岩相互作用研究的回顾与展望[J]. *地球科学*, 2002, 27(2): 127-132.
- [5] 邓军, 高帮飞, 王庆飞, 等. 成矿流体系统的形成与演化[J]. *地质科技情报*, 2005, 24(1): 49-54.
- [6] 於崇文. 地球化学系统的复杂性探索[J]. *地球科学*, 1994, 19(3): 283-286.
- [7] 於崇文. 地质系统的复杂性(下)[M]. 北京: 地质出版社, 545-1135.
- [8] 王玉荣, 王志祥, 张生. 水/岩反应实验与成矿作用[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2000, 19(4): 426-427.
- [9] 张可清, 杨勇. 蚀变岩质量平衡计算方法介绍[J]. *地质科技情报*, 2002, 21(3): 104-107.
- [10] Gresens R L. Composition-volume relationships of metasomatism [J]. *Chemical Geology*, 1967, 2: 47-55.
- [11] Grant J A. The isocon diagram—a simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration [J]. *Economic Geology*, 1986, 81: 1976-1982.
- [12] O'Hara. Fluid flow and volume loss during mylonitization: An origin for phyllonite in over thrust setting, North carolina, U. S. A [J]. *Tectonophysics*, 1988, 156(1): 21-36.
- [13] Brimhall G H, Dietrich W F. Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume, density, porosity and strain in metasomatic hydrothermal systems: Results on weathering and pedogenesis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51: 566-587.
- [14] MacLean W H. Mass change calculations in altered rock series [J]. *Mineralium Deposita*, 1990, 25: 44-49.
- [15] Ague J J. Evidence for major mass transfer and volume strain during regional metamorphism of pelites [J]. *Geology*, 1991, 19: 855-858.
- [16] 邓海琳, 涂光炽, 李朝阳, 等. 地球化学开放系统的质量平衡: 1. 理论[J]. *矿物学报*, 1999, 19(2): 121-131.
- [17] 魏俊浩, 刘丛强, 丁振举. 热液型金矿床围岩蚀变过程中元素迁移规律——以张家口地区东坪、后沟、水晶屯金矿为例[J]. *矿物学报*, 2000, 20(2): 200-206.
- [18] 凌其聪, 刘丛强. 层控夕卡岩型矿床成矿系统的元素活动性及质量迁移——以铜陵冬瓜山铜矿床为例[J]. *矿物学报*, 2003, 23(1): 37-44.

- [19] Pasi Eilu, Edward J Mikucki. Alteration and primary geochemical dispersion associated with the Bulletin lode-gold deposit, Wiluna, Western Australia[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1998, 63: 73-103.
- [20] Ozcan Yigit, Albert H Hofstra. Lithogeochemistry of Carlin-type gold mineralization in the Gold Bar district, Battle Mountain-Eureka trend, Nevada[J]. Ore Geology Reviews, 2003, 22: 201-224.
- [21] 钟增球, 游振东. 剪切带的成分变异及体积亏损——以河台剪切带为例[J]. 科学通报, 1995, 40(10): 913-916.
- [22] 孙晓明, 徐克勤, 任启江. 夹皮沟金矿带韧性剪切变形中的水岩反应及物质组分变化规律[J]. 矿床地质, 1996, 15(4): 309-317.
- [23] 於崇文. 广义地球化学动力学[J]. 大自然探索, 1996, 15(58): 14-17.
- [24] Axel Brunsman, Gerhard Franz, Jorg Erzinger. REE mobilization during small-scale high-pressure fluid-rock interaction and zoisite/fluid partitioning of La to Eu[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(4): 559-570.
- [25] 刘玉山, Bartholomew J. 25~200℃氯化钠溶液金配合物的拉曼光谱研究[J]. 地质论评, 1996, 42(5): 430-433.
- [26] 党志, 候瑛. 玄武岩-水相互作用的溶解机理研究[J]. 岩石学报, 1995, 11(1): 9-15.
- [27] Heinrich C A, Walshe J L, Harrold B P. Chemical mass transfer modeling of ore-forming hydrothermal systems: current practice and problems [J]. Ore Geology Review, 1996, 10: 319-338.
- [28] 夏林, 徐启东, 吕古贤, 等. 铜山口铜(钼)矿床成矿流体水-岩反应数值模拟[J]. 地质地球化学, 2003, 31(3): 6-12.
- [29] Reed M H. Calculation low-temperature, skarn-forming reactions and the controls on gold precipitation in skarn ore (abstract) [J]. Geology Science America Abstract Program, 1986, 18: 727.
- [30] Giovanni Gianelli, Sergio Grassi. Water-rock interaction in the active geothermal system of Pantelleria, Italy[J]. Chemical Geology, 2001, 181: 113-130.
- [31] 於崇文. 云南个旧成矿区锡石-硫化物矿床原生金属分带形成的地球化学动力学机制[J]. 地质学报, 1990, 64(3): 226-237.
- [32] Argue J J, Brimhall G H. Geochemical modelling of steady state fluid flow and chemical reaction during supergene enrichment of porphyry copper deposits[J]. Economic Geology, 1989, 84: 506-528.
- [33] 吴大清, 彭金莲, 魏俊峰, 等. 蒙脱石与铅锌溶液界面反应动力学[J]. 矿物学报, 2000, 20(2): 97-101.
- [34] 谭凯旋, 张哲儒. 2mol/L NaCl 溶液中辉铜矿, 黄铜矿和斑铜矿的溶解动力学[J]. 科学通报, 1994, 39(23): 2165-2168.
- [35] 张生, 李建平, 王玉荣, 等. 25~75℃酸性 NaCl 溶液中方铅矿的溶解动力学[J]. 地球化学, 2002, 31(6): 597-592.
- [36] Mao Bai, Roegiers J C. Fluid flow and heat flow in deformable fractured porous media[J]. International Journal of Engineering Sciences, 1994, 32(10): 1615-1633.
- [37] Hobbs B E, Zhang Y, Ord A, *et al.* Application of coupled deformation, fluid flow, thermal and chemical modelling to predictive mineral exploration [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 69-70: 505-509.
- [38] 张德会. 计算流体地球化学研究的进展[J]. 地学前缘, 2000, 7(增刊): 147-158.
- [39] 邓军, 王庆飞, 黄定华. 成矿流体输运物理机制研究的关键难题与方法体系[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 393-398.
- [40] Tobin H, Vannucchi P, Meschede M. Structure, inferred mechanical properties, and implications for fluid transport in the decollement zone, Costa Rica Convergent Margin [J]. Geology, 2001, 29(10): 907-910.
- [41] Wawrzyniec T, Selverstone J, Axen G J. Correlations between fluid composition and deep-seated structural style in the footwall of the simple low-angle normal fault, Switzerland [J]. Geology, 1999, 27(8): 715-718.
- [42] Sausse J, Jacquot E, Fritz B, *et al.* Evolution of crack permeability during fluid-rock interaction. Example of Brézouard granite (Vosges, France) [J]. Tectonophysics, 2001, 336: 199-214.
- [43] 邓吉牛. 成矿作用动力学研究中的新理论——物理化学流体动力学[J]. 地质科技情报, 1994, 13(1): 65-70.
- [44] 谭凯旋, 谢焱石, 赵志忠, 等. 构造流体成矿体系的反应输运力学耦合模型和动力学模拟[J]. 地学前缘, 2001, 8(4): 311-321.
- [45] Cline J S, Bondnar R J, Rimstidt J D. Numerical simulation of fluid flow and silica transport and deposition in boiling hydrothermal solutions: application to epithermal gold deposits [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 9085-9103.
- [46] Cox S F. Faulting processes at high fluid pressures: an example of fault valve behavior from the Wattle Gully Fault, Victoria, Australia [J]. Journal of Geophysical Research B, 1995, 100(7): 13007-13020.
- [47] Bowers T S. The deposition of gold and other metals: pressure induced fluid immiscibility and associated stable isotope signatures[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 55: 2447-2434.
- [48] 邓军, 翟裕生, 杨立强, 等. 剪切带构造流体成矿系统动力学模拟[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 116-127.
- [49] 郭国章, 任启江, 方长泉, 等. 德兴斑岩铜矿成矿过程中地下水运移的动力学模拟[J]. 地球化学, 1994, 23(4): 402-410.
- [50] Steefel C I, Lichtner P C. Multicomponent reactive transport in discrete fractures; I, Controls on reaction front geometry [J]. Journal of Hydrology, 1998, 209(1-4): 186-199.
- [51] Zhuwei jiang, Nicholas H S Oliver, Terence D Barr, *et al.* Numerical modeling of fault-controlled fluid flow in genesis of Tin deposits of the Malage ore field, Gejiu mining district, China [J]. Economic geology, 1997, 92: 228-247.
- [52] Yang Jianwen, Lactychev K, Edwards R N. Numerical computation of hydrothermal fluid circulation in fractured Earth

structures[J]. Geophys. J. Int., 1998, 135: 627-649.

[53] 曹正林,赵锡奎,王英民,等. 鄂尔多斯盆地北部古风化壳岩石一流体反应动力学模拟研究[J]. 沉积学报, 1997, 15(4): 91-96.

[54] 段振豪,吕万军,李思田,等. 地质流体热力学性质的计算机模拟与分子动力学模拟[J]. 中国科学基金, 2000, 2: 112-117.

[55] Anthony J Park, Peter J Ortoleva. WRIS.TEQ: multi-mineralic water-rock interaction, mass-transfer and textural dynamics simulator[J]. Computers & Geosciences, 2003, 29: 277-290.

[56] Brien G O, Bean C J, McDermott F. Numerical and experimental modelling of fluid-rock interactions with heterogeneous porosity [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 69-70: 119-125.

TREND OF STUDY ON WATER ROCK REACTION IN ORE-FORMING PROCESS

GAO Bang-fei^{1,2}, DENG Jun^{1,2}, WANG Qing-fei^{1,2}, YANG Li-qiang^{1,2}, WAN Li³

(1. State Key Laboratory of Geological process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083, China; 2. Key Laboratory of Lithosphere Tectonics and Lithoprob- ing Techology of Ministry of Education , China University of Geosciences, Beijing, 100083, China;

3. School of Mathematics and Information Science, Guangzhou University, Guangzhou, 510405, China)

Abstract: Water-rock reaction (WRR) is not only the significant research content of metallogeny, but also the frontier geoscience problem. Introduction of complexity theory, hydrodynamics and some other theories and the improvement of testing technology led to the WRR research developing in a systematical and quantitative direction and the relevant achievements. This paper focuses on the process and mechanism of element migration and isotope fractionation based on which geological data of elements and isotopes are used to tracing fluid activity and estimating the process of WRR. Quantitative calculation, numerical simulation and physical experiment are the main means of WRR study, and each method has its own characters. For the complexity of water-rock system, all the methods should be used to remolding the geological process of WRR.

Key Words: water-rock reaction; dynamics; quantitative calculation; numerical simulation; physical experiment

(上接第 12 页)

RESEARCH ON QUANTITATIVE PREDICTION OF MINERAL RESOURCES

LI Sui-min¹, YAO Shu-zhen², ZHOU Zong-gui²

(1. The Resources Collage of Shijiazhuang University of economy, Shijiaz huang 050031, China; 2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: with the data proceession and data collection techniques, quantitative prediction of mineral resources has developed from statistic prediction at initial stages to multi-information synthesis quantitative prediction based on computer in recent year. This paper summarizes the development and the direction of quantitative prediction of mineral resources in recent years.

Key Words: prediction; prediction method; quantitative prediction