

构造成矿非线性动力学: 2. 湘西金矿研究实例

谭凯旋, 谢焱石, 赵志忠, 李小明

(中国科学院长沙大地构造研究所, 湖南 长沙 410013)

摘 要: 应用递增应力流变学方法对湘西沃溪金矿成矿过程中构造变形、应力、流体流动、地球化学反应及成岩成矿作用等多过程间的耦合作用和非线性特征进行了模拟和分析。构造压溶作用对矿源层中成矿物质的溶解与迁移起了重要作用。断裂作用可以产生比原岩渗透率高近 4 个数量级的断裂渗透率, 从而促进流体的流动、组分扩散和在断裂中的汇聚成矿。不同岩性对断裂作用和断裂渗透率的演化有重要影响, 并且构造、流体、岩石之间存在强烈的非线性耦合作用, 马底驿组中段是最有利的构造成矿层位。

关键词: 构造成矿; 压溶作用; 断裂渗透率; 非线性耦合; 动力学模拟; 湘西金矿

中图分类号: P618.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1552(2002)01-037-06

构造是热液成矿中最重要的控制因素之一 [1978, 陈国达; 1996, 翟裕生], 构造成矿作用或构造-流体-成矿作用的研究引起了国内外地质学家的广泛重视 [1978, 陈国达; 1996, 翟裕生; 1999, McCaffrey; 2000, 邓军, 等]。构造成矿作用是各种转变过程(如水-岩反应、成岩成矿反应), 各种输运过程(如流体流动、质量迁移、能量输运、动量传递等)和力学过程(如应力、应变和构造变形)的耦合, 因此, 构造成矿作用与很多其它地质体系一样, 是非平衡的和非线性的动力学过程, 必须从多过程、多因素的非线性耦合作用来研究构造成矿作用的动力学过程和动力学机制 [2000, 邓军, 等; 2000, 谭凯旋, 等]。在前一篇文章中我们提出了构造成矿作用的非线性动力学研究的递增应力流变学方法, 应用该方法将构造变形、应力、流体流动与质量迁移、能量输运、地球化学反应与成岩成矿作用等多过程耦合起来建立了构造成矿的非线性动力学模型和 1~3 维数值模拟程序。本文以湘西沃溪金矿多金属

矿床为实例, 应用该方法对其构造成矿动力学过程和成矿动力学机制进行初步模拟与分析。

1 湘西金矿地质、构造与成矿特征

湘西金矿是一个大型金锑钨共生的多金属矿床, 它位于雪峰山弧形构造隆起带由北东转向东西方向的转折部位。矿区内主要出露元古界冷家溪群和板溪群浅变质岩系。冷家溪群主要为灰绿色、青灰色条带状板岩, 夹少量透镜状变质粉砂岩、细砂岩和细碧质玄武岩及石英砂岩。板溪群马底驿组由紫红色条带状绢云母板岩、砂质板岩组成, 下段为砂质板岩夹石英细砂岩, 厚度 70~250 m; 中段为紫红色含钙绢云母板岩, 厚度 300~800 m, 为主要含矿层位; 上段为灰绿色砂质板岩, 厚度 40~200 m。五强溪组为灰绿色长石石英砂岩、砂质板岩, 厚度 > 450m。此外有少量白垩系红色砂砾岩不整合覆盖于板溪群之上。

收稿日期: 2001-05-29; 改回日期: 2001-11-15

基金项目: 本研究受中国科学院九五重点项目(编号: KZ952-s1-402), 中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-101)和国家自然科学基金项目(编号: 70171057)资助

作者简介: 谭凯旋(1963-), 男, 汉族, 湖南湘潭人。博士, 研究员, 主要从事地球化学和成矿动力学研究。

矿区构造(图 1)主要有古佛山复背斜、沃溪大断裂及众多的层间断层和次级褶皱,构造线方向为近东西向至北东向。沃溪大断裂是一条主干断裂,呈近东西向,倾向北,倾角约 30° ,横贯整个矿区长达 15 km 以上,为板溪群马底驿组与五强溪组之间的层间滑动大断裂,断层破碎带宽约 20~30 m。矿体产于板溪群马底驿组中段紫红色-灰白色含钙绢云母板岩的层间断裂带及次生裂隙中,呈缓倾斜的脉状和网脉状产出,总体产状与围岩基本一致。

矿石中金属矿物主要有自然金、辉锑矿、白钨矿、黑钨矿、黄铁矿,其次有少量的毒砂、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿;脉石矿物以石英为主,其次有方解石、绢云母、绿泥石、白云石、伊利石等。按矿物共生组合可划分 5 种主要矿石类型:白钨矿-石英脉型;辉锑矿-自然金-石英脉型;白钨矿-辉锑矿-自然金-石英脉型;黄铁矿-自然金-石英脉型;白(黑)钨矿-自然金-石英细脉-蚀变板岩型。根据矿物共生组合关系,矿石结构构造与包裹体资料,可划分 4 个流体活动与成矿阶段:(1)无矿碳酸盐-石英阶段;(2)石英-白钨矿阶段,为钨的主要成矿期;(3)石英-自然金-硫化物阶段,为金、锑的主要成矿期,其特点是硫化矿物大量出现;(4)石英-碳酸盐阶段。对矿床的流体包裹体地球化学、同位素地球化学分析[1984, 罗献林,等;1992, 牛贺才,等]表明,湘西金矿成矿流体为中低温、中等盐度、弱碱性、弱还原性的以建造水和大气降水混合为主的热液流体,在构造减压的低压环境中成矿。成矿物质主要来源于围岩冷家溪群和板溪群地层。

发育于马底驿组中段的层间断层,由数条近平行展布的压扭性逆冲层滑断层组成,这些层滑断层是矿区内的主要成矿构造,每一条层滑断层都产出相应的矿脉,断裂带内的许多构造岩本身就是矿体。矿脉的尖灭方式也主要是以断层线而消失。目

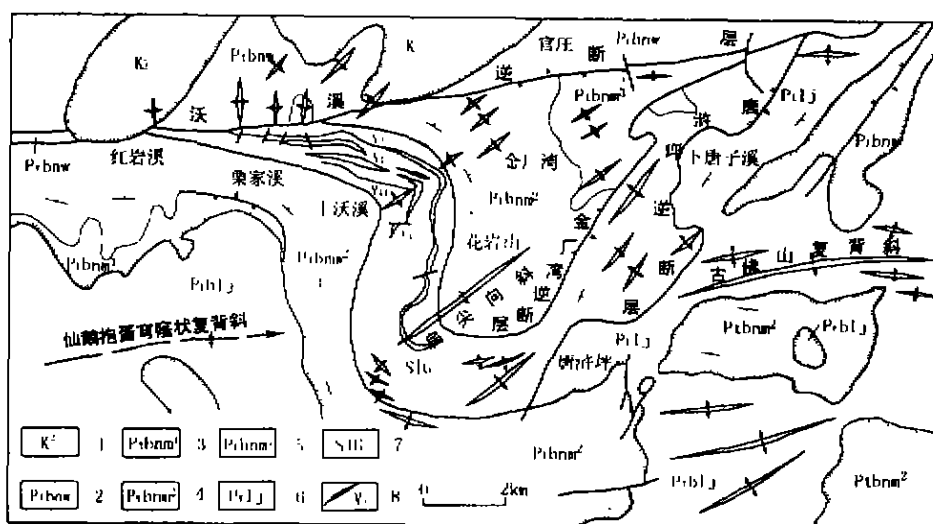


图 1 湘西沃溪金锑钨矿区地质构造简图

Fig. 1 Geological and structural map of the Woxi Au-Sb-W deposit, western Hunan, China

1-白垩系红色砾岩;2-板溪群五强溪组;3-板溪群马底驿组上段;4-板溪群马底驿组中段;5-板溪群马底驿组下段;6-冷家溪群;7-灰绿色板岩夹层;8-矿脉及编号

前已发现 7 条层脉,其中具工业价值的主要有 4 条。该类断裂不仅为区内成矿流体提供了运移通道,而且还是区内矿床的容矿与储矿空间,它们直接控制着区内成矿流体的活动,并使流体中的成矿物质在这些部位发生富集并最终形成矿床。

2 动力学模拟结果及讨论

根据矿床地质、地球化学特征,动力学模拟中考虑 5 个地层岩性,由下至上分别为:①冷家溪群(Pt_{lj}),板岩,主要矿物组成及体积分数为石英(0.6)、长石(0.15)、方解石(0.05)、高岭石(0.05)、伊利石(0.05),模拟厚度 150 m;②板溪群马底驿组下段(Pt_{bnm1}),砂质板岩,主要矿物组成石英(0.51)、长石(0.15)、绢云母(0.09)、方解石(0.04)、高岭石(0.05)、伊利石(0.05),厚度 200 m;③板溪群马底驿组中段(Pt_{bnm2}),含钙绢云母板岩,主要矿物组成石英(0.49)、方解石(0.12)、长石(0.1)、绢云母(0.09)、高岭石(0.05)、伊利石(0.05),厚度 400 m;④板溪群马底驿组上段(Pt_{bnm3}),砂质板岩,主要矿物组成石英(0.6)、长石(0.15)、方解石(0.05)、高岭石(0.05)、伊利石(0.05)、绢云母(0.01),厚度 150 m;⑤板溪群五强溪组(Pt_{bnw}),长石石英砂岩,主要矿物组成石英(0.51)、长石(0.23)、方解石(0.05)、绢云母(0.03)、高岭石(0.02)、伊利

石(0.02), 厚度 600 m。

构造成矿首先反映在构造应力对地层(矿源层)中矿物特别是成矿物质溶解与活化迁移的影响, 这是导致一般流体向成矿流体转化的关键, 主要是通过压力溶解作用[1990, 1995, Dewers *et al.*; 1996, Björkum; 1999, Renard]来进行。 SiO_2 是成矿流体中的重要组分之一, 它与 Au 可形成 Au-Si 络合物而有利于 Au 的活化迁移, 石英是最主要的脉石矿物, 湘西金矿主要为石英脉型金矿床。图 2 为地层中石英矿物压力溶解速率的演化的模拟结果, 图 3 为石英压力溶解速率与应力演化关系的模拟结果。石英的压溶速率从早期至晚期逐渐降低, 且压溶速率受应力的控制, 随应力增高压溶速率也显著增大(图 3)。从金属矿物的压溶作用更能直接反映出成矿流

体形成演化的动力学控制机理。图 4 为地层中 Au 压溶速率随时间演化的模拟结果, 从早期至晚期 Au 的压溶速率逐渐减小, 并在大约 40 Ma 之后其压溶速率变为 0; 与石英相似, 金的压溶速率也是与应力呈正相关关系(图 5), 随应力减小而减小, 并当应力小于一定值(临界值)后, 其压溶速率变为 0。上述模拟结果表明构造应力对矿物的压溶作用和成矿物质的活化迁移、成矿流体的形成有重要的影响。

构造对成矿的另一个重要作用是对岩石渗透率和流体运移的影响 [1996, Sibson; 1997, Holness; 1997, Curewitz; 1998, Koudina]。图 6 是湘西金矿成矿过程中不同地层断裂渗透率随时间演化的模拟结果, 可见断裂渗透率最大可达 10^{-6} 数量级, 一般页岩的渗透率为 10^{-10} Darcy 左右 [1997, Holness], 主要含矿层马底驿组中段的断裂渗透率比未断裂的同一岩性围岩的渗透率高近 4 个数量级(图 7), 显然断裂作用可显著增高岩石的渗透率。图 6 中还可见不同地层岩性的断裂渗透率大小和演化特征有较大差别, 其中冷家溪群、板溪群马底驿组下段和上段的断裂渗透率均随时间显著降低; 马底驿组中段断裂渗透率先随时间逐渐增高, 然后在 20 Ma 后逐渐缓慢降低; 五强溪组的断裂渗透率则一直随时间缓慢增高。不同地层岩性的断裂渗透率大小相差达 1~3 个数量级, 结合断裂渗透率演化随深度的分布(图 8), 可见断裂渗透率以马底驿组中段(特别是在早期)最高, 且持续时间长; 而在后期五强溪组中也达到或高于马底驿组中段。因此, 马底驿组中段中的断裂是最有利于流体流动汇聚和成矿的, 因此湘西沃溪金矿的矿体主要产于马底驿组中; 五强溪组也具

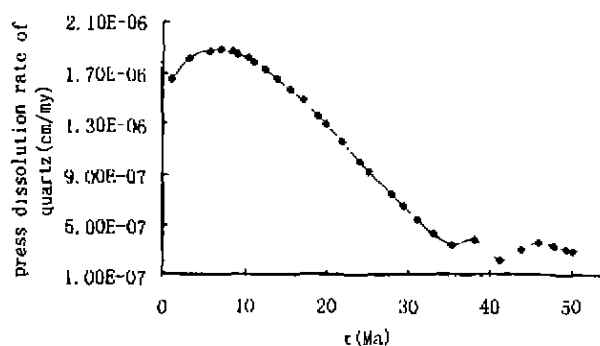


图 2 湘西金矿围岩中石英压溶速率的演化

Fig. 2 Evolution of press dissolution rate of quartz in wall rock in the Xiangxi gold deposit

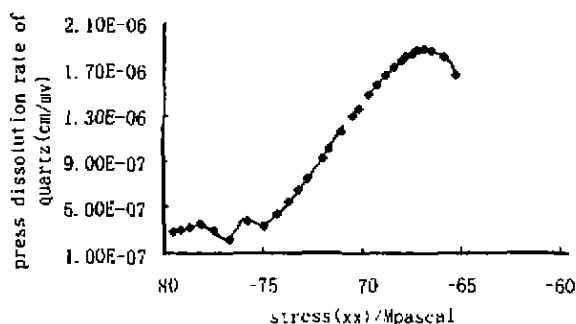


图 3 湘西金矿成矿过程中围岩中石英压溶速率与应力演化的关系

Fig. 3 Relationship between press dissolution rate of quartz in wall rock and stress in the Xiangxi gold deposit

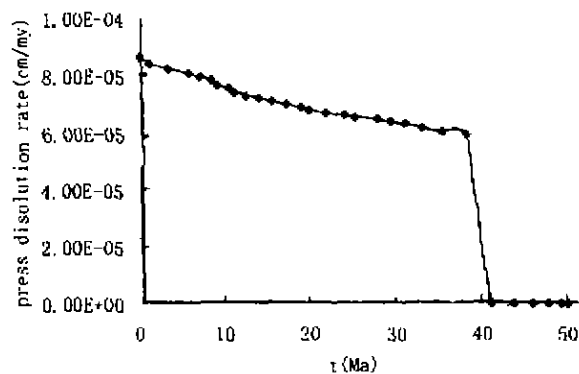


图 4 湘西金矿围岩中 Au 压力溶解速率的演化

Fig. 4 Evolution of press dissolution rate of Au in wall rock in the Xiangxi gold deposit

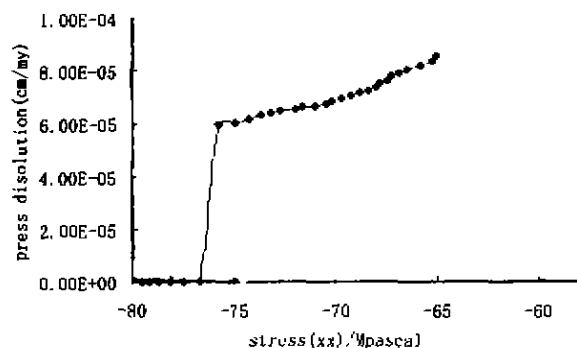


图 5 湘西金矿围岩中 Au 压溶速率与应力的关系

Fig. 5 Relationship between press dissolution rate of Au in wall rock and stress in the Xiangxi gold deposit

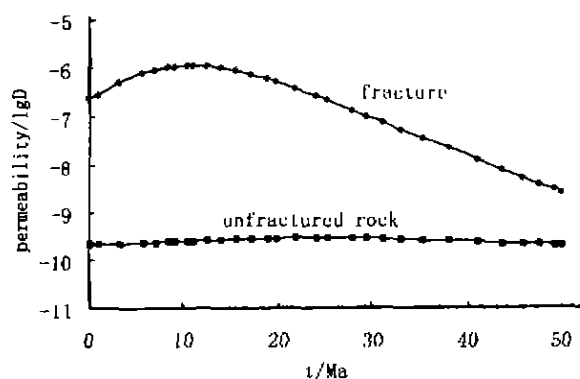


图 7 湘西金矿成矿过程中成矿层断裂渗透率与未断裂围岩渗透率的演化

Fig. 7 Evolution of fracture permeability of ore-forming strata and permeability of unfractured wall rock

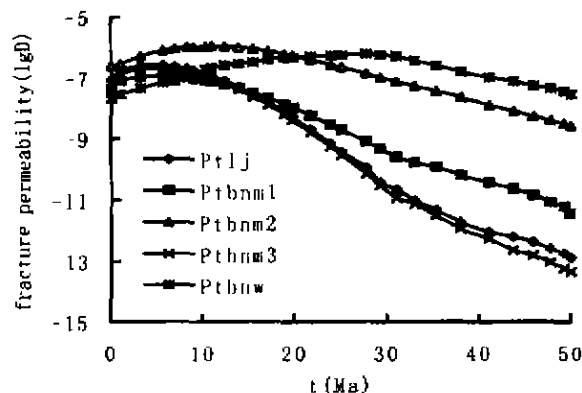


图 6 湘西金矿成矿过程中不同地层断裂渗透率的演化

Fig. 6 Evolution of fracture permeability in different strata during ore-forming in the Xiangxi gold deposit

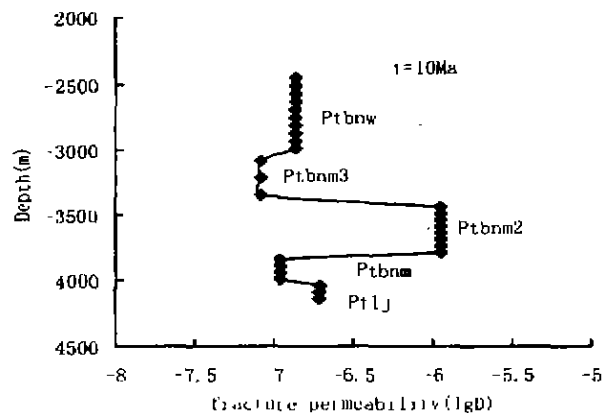
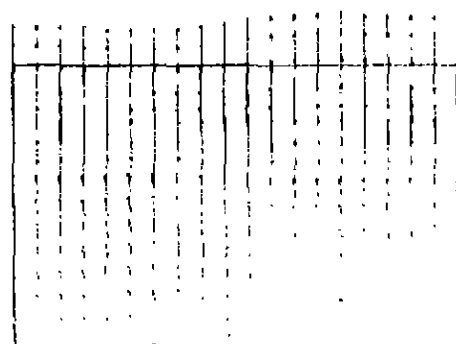
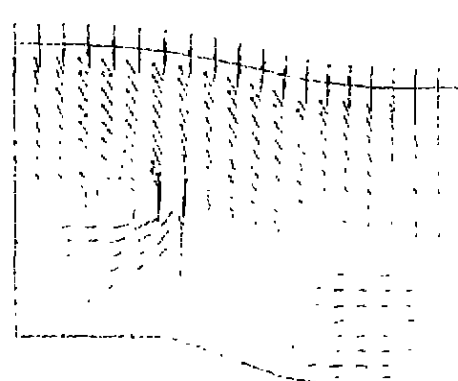


图 8 湘西金矿成矿过程中断裂渗透率演化在不同地层中的分布特征

Fig. 8 Distribution of fracture permeability in different strata during ore-forming in the Xiangxi gold deposit



(a: t=0Ma)



(b: t=20Ma)

图 9 湘西金矿断裂作用引起的流体流场的演化

Fig. 9 Evolution of fluid flow field affected by fracturing in the Xiangxi gold deposit

有高的断裂渗透率(特别在后期),也应有利的构造成矿层位,实际上该金成矿带中其它许多金矿床主要产于五强溪组中。上述模拟结果表明,构造与岩石性质和流体之间存在强烈的耦合作用,不同岩石的断裂作用和断裂渗透率存在显著差异;断裂作用和高断裂渗透率促进了流体的流动,同时流体活动可引起断裂的愈合作用和断裂渗透率的降低,从而构成非线性的耦合与反馈关系。

图9是断裂带中流体流场演化的二维剖面模拟结果,开始时为一稳定的流场,断裂作用导致岩石孔隙度和渗透率(断裂渗透率)增高,断裂带为流体提供流动通道,并使流体在断裂带中汇聚(图9b)。

扩散作用是流体中成矿组分的重要迁移方式,扩散系数是研究和描述扩散作用的主要参数。图10是成矿过程中流体组分扩散系数演化随深度在不同地层中的分布,可见马底驿组中段和五强溪组中扩散系数显著高于冷家溪群和马底驿组上、下段三个层位,这说明马底驿组中段和五强溪组二个层位是最有利于流体扩散迁移和成矿的。进一步的模拟与分析发现流体中组分扩散系数与断裂渗透率的演化具有复杂的耦合关系(图11),图中曲线呈指状,从右边的曲线看,扩散系数与断裂渗透率呈近于线性的正相关关系,即随断裂渗透率增大扩散系数也增大,这符合正常的规律;但在中间区段出现扩散系数随断裂渗透率的增大而减小的反常现象,从而使曲线呈指状。究其原因,主要是因为组分扩散与断裂渗透率之间存在非线性耦合关系,断裂渗透率的增大无疑有利于流体的流动和组分的扩散迁移,使扩散系数也随之增大;但随着扩散系数和扩散迁移的量的增大,一方面将引起断裂中矿物的沉淀并引起断裂渗透率的降低,另一方面将引起断裂带内应力的变化而影响进一步的断裂作用和断裂渗透率的发展,断裂渗透率的降低又会导致扩散作用和扩散系数的减小,并且这二者之间存在着竞争和时间滞后的问题,因此出现图11中复杂的耦合关系。

3 结 论

(1) 对湘西沃溪金锑钨矿床构造成矿的动力学模拟表明,构造压溶作用对地层(矿源层)中成矿物质的溶解和活化迁移有重要意义,压溶速率与应力呈正相关关系。

(2) 断裂作用产生的断裂渗透率可显著增高岩石的渗透率,从而促进流体的流动和在断裂中汇

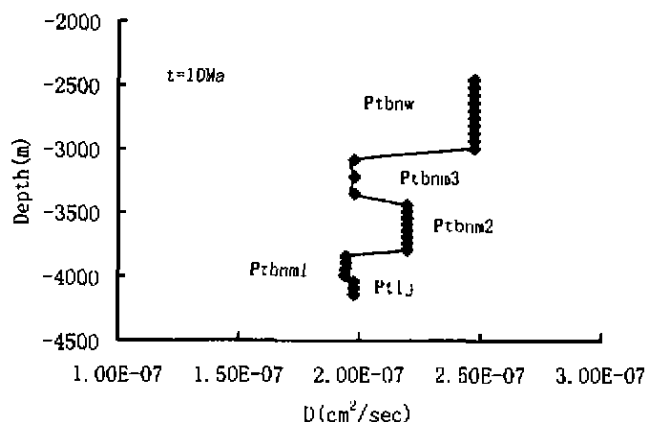


图10 湘西金矿不同地层流体中成矿组分扩散系数的分布

Fig. 10 Distribution of diffusion coefficients of fluid species in different strata in the Xiangxi gold deposit

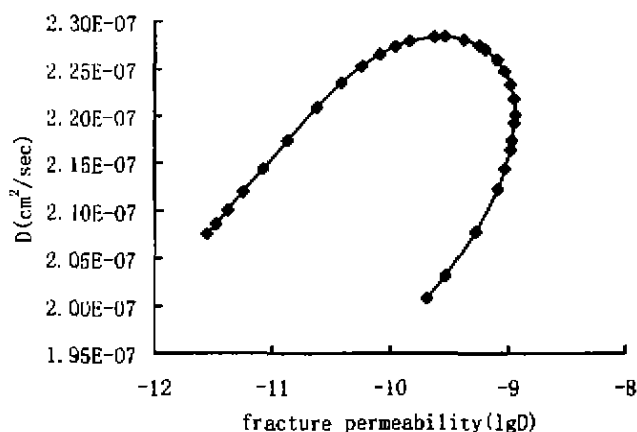


图11 湘西金矿流体中成矿组分扩散系数与断裂渗透率的关系

Fig. 11 Relationship between diffusion coefficients of fluid species and fracture permeability in the Xiangxi gold deposit

聚。不同岩性对断裂作用和断裂渗透率的演化有重要影响,并且构造、流体、岩石之间存在强烈的非线性耦合作用,马底驿组中段是最有利的构造成矿层位。

(3) 断裂作用可以促进流体组分的扩散迁移,断裂渗透率越大,扩散系数也越大;同时断裂与流体扩散存在非线性耦合作用,流体扩散作用又可引起断裂的愈合和断裂渗透率的降低。

参考文献:

- 1978 陈国达. 成矿构造研究法[M]. 北京:地质出版社.
- 1984 罗献林,易诗军,梁金城. 论湘西沃溪金锑钨矿床的成因[J]. 地质与勘探, 20(7): 1-10.

- 1990 Dewers T, Ortoleva P. A coupled reaction-transport-mechanical model for intergranular pressure solution, stylolites and differential compaction and cementation in clean sand stone [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 54: 1609 - 1625.
- 1992 牛贺才, 马东升. 湘西层控金矿床成因机制的研究 [J]. *矿床地质*, 11(1): 65 - 75.
- 1995 Dewers T, Hajash A. Rate-laws for water-assisted compaction and stressed-induced water-rock interaction in sandstones [J]. *J Geophys Res*, 100: 13093 - 13112.
- 1996 Bjorckum P A. How important is pressure in causing dissolution of quartz in sandstones? [J]. *J Sediment Res*, 66: 147 - 154.
- 1996 Sibson R H. Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes [J]. *J Struct Geol*, 18: 1031 - 1042.
- 1996 翟裕生. 关于构造 - 流体 - 成矿作用研究的几个问题 [J]. *地学前缘*, 3(3 - 4): 230 - 236.
- 1997 Curewitz D, Karson J A. Structural settings of hydrothermal outflow: Fracture permeability maintained by fault propagation and interaction [J]. *J Volcanol Geotherm Res*, 79: 149 - 168.
- 1997 Holness M B. Deformation-enhanced fluid transport in the Earth's crust and mantle [M]. London: Chapman & Hall.
- 1998 Koudina N, Garcia R G, Thovert J F, Adler P M. Permeability of three-dimensional fracture networks [J]. *Physical Review E*, 57: 4466 - 4479.
- 1999 McCaffrey K J W, Lonergan L, Wilkinson J J. Fractures, fluid flow and mineralization [M]. Geological Society, London, Special Publications, 155.
- 1999 Renard F, Park A, Ortoleva P, Gratier J-P. An integrated model for transitional pressure solution in sandstones [J]. *Tectonophysics*, 312: 97 - 115.
- 2000 邓军, 杨立强, 翟裕生, 等. 构造 - 流体 - 成矿系统及其动力学的理论格架与方法体系 [J]. *地球科学*, 25(1): 71 - 78.
- 2000 谭凯旋, 谢焱石, 郭定良. 构造 - 流体 - 成矿体系的耦合动力学: 以湘西金矿为例 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 19(4): 241 - 243.

NONLINEAR DYNAMICS OF TECTONIC MINERALIZATION: 2. THE STUDY CASE FOR XIANGXI Au DEPOSIT, HUNAN, CHINA

TAN Kai-xuan, XIE Yan-shi, ZHAO Zhi-zhong, LI Xiao-ming

(Changsha Institute of Geotectonics, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410013, China)

Abstract: The coupling of many geological processes such as structural deformation, stress, fluid flow, geochemical reaction and diagenesis and mineralization and nonlinear properties are simulated and analyzed using incremental stress rheology approach for the Xiangxi Au deposit, Western Hunan, China. The tectonic pressure dissolution plays an important role in dissolution and transport of ore-forming matter in source bed. Fracturing can bring high fracture permeability that is about 4 orders of magnitude higher than the permeability of wall rock and facilitating fluid flow and focusing and mineralizing in fracture zone. The fracturing and the evolution of fracture permeability of different rocks are different. Tectonics, fluid and rock exhibit strange nonlinear coupling, and the Mid member of the Madiyi formation is a favorable horizon for tectonic mineralization.

Key words: Tectonic mineralization; pressure dissolution; fracture permeability; nonlinear coupling; dynamic modeling; Xiangxi Au Deposit, Hunan