

· 问题讨论 ·

文章编号 :1671-1947(2005)03-0219-04

中图分类号 :P612 ;P618.51

文献标识码 :A

含金韧-脆性断裂中界面转换成矿机制探讨

舒 斌

(中国地质调查局发展研究中心,北京 100037)

摘 要:通过对金矿构造岩、构造矿石的古应力、流体包裹体和物质成分等的研究,探讨了断裂构造从韧性到脆韧性的演化过程中,界面转换成矿的特征,包括动力学特征、流体演化特征、构造对流体驱动机制等。认为断裂构造从韧性到脆韧性、脆性的演变过程,是成矿物质从分散到局部富集,再到富集成矿的过程,成矿流体的成分也发生相应的变化。

关键词:断裂;成矿;界面转换

热液矿床,特别是内生热液金矿床,其构造控矿作用是极其明显的,这一控矿构造主要表现为断裂构造。断裂构造从韧性到韧-脆性的演化过程是金元素富集成矿的过程。早期韧性作用处于压性或压扭性环境,岩石变得更加致密,含水性降低,孔隙度变小,同时,成矿流体的成分发生变化,成矿物质发生活化和迁移;晚期韧-脆性阶段处于张性或张扭性环境,形成容矿裂隙,岩石更加疏松,含水性升高,孔隙度变大,其开放的环境使流体与围岩发生水岩交换,流体的物理化学性质发生改变,成矿物质发生沉淀并富集成矿。这一过程中的动力学特征、流体演化特征、成矿作用三者之间为一个有机的整体,相互作用,相互影响。构造作用下,流体与围岩发生物质交换(交代和蚀变),岩石的物化性质发生改变,成矿物质发生活化与迁移,在有利部位形成工业矿体。同时,变形变质后的岩石其物理化学性质(孔隙度、吸附性等)发生改变,流体运移能力和应力的作用效应也发生改变。这些方面的研究受到了国内外地质学家,特别是矿床学家的关注,已成为当今矿床学研究的一个热点。但构造对流体驱动机制、流体的物理化学性质与岩石的孔隙度、渗透性三者之间的关系还缺乏系统的研究。

Sibson^[1-3]和 Ramsay^[4, 5]最早论述了韧性剪切带的概论。几乎同时,Boyle 于 1979 年首次提出了韧性剪切带型金矿床(ductile shear zone-type gold deposit)——一种成矿机制与控矿因素都与韧性剪切带有关的金矿床类型,这里所说的韧性剪切带型金矿床应该是指由韧性剪切带和韧-脆性断裂带的组合所控制的金矿床。Bonnemaison^[6-8]丰富了含金剪切带(gold-bearing shear zone)的内容,之后,国内外相继报道了许多大型和超大型含金剪切带型金矿床^[9-35],并且发现,不仅蚀变岩型金矿与韧性剪切带有关,而且大量石英脉金矿也与韧性剪切带有关。学者们从不同角度探讨了含金剪切带的特征、控矿作用及演化过程。

1 成矿构造动力学研究

成矿构造动力学(metallogenic dynamics)是指韧-脆性断裂构造动力对成矿系统的启动、运行机制、成矿物质(包括成矿元素和成矿流体)的运动学、几何学特征,以及由此产生的成矿过程、聚矿能力和成矿产物的差异,包括系统动力学演化、机制、模式和模型等几个方面。现有研究多侧重于系统动力学分析,研究系统随时间的演化特征。成矿流体的形成和运移、成矿物质的活化和迁移是在一定的动力学条件下进行的,应力环境的改变造成成矿流体的失稳,成矿元素发生沉淀富集,矿床、矿体和矿脉就位,这对成矿预测具有重要意义。因此,成矿动力学研究引起地质学家的关注。Bonnemaison 等提出了“含金剪切带”3 阶段成矿模式(three-stage model),认为早期形成剪切糜棱岩,伴随强烈蚀变和浸染状金矿化;中期剪切带内开放裂隙产生且透镜状矿脉定位;晚期脆性断裂与网脉状矿化叠加。Sibson^[2]和 Robert^[36]等提出了“断裂阀-地震泵吸-周期性破裂愈合”成矿模式,认为在地下 10 km 左右的韧-脆性剪切转换带(transaction belt),由循环反复发生的高角度逆断层地震破裂引起的巨大流体压力降可影响到二氧化硅和其他矿物的溶解度,并导致矿物和金的沉淀。Cameron^[9]提出了深部韧性剪切带氧化变形作用中金的活化、迁移模式。Spencer 和 Weley 提出了滑脱断层成矿模式。何绍勋等^[37, 38]提出了滑脱构造成矿模式。Kerrich 和 Fyfe、Hodgson 也分别提出了各自的成矿机制和模式。沈保丰^[39]等认为韧-脆性剪切转换带是一个重要的物理化学条件转换带,其下岩石渗透率低,其上岩石渗透率高。过渡带下部的流体在构造应力、断层泵吸力和地热梯度、岩浆热等的作用下上升,并在过渡带内自由对流,而过渡带以上主要为天水下渗,两种性质的流体在过渡带发生混合,从而造成成矿流体失稳沉淀。李德威^[17]、陈柏林^[28, 40]等根据金在韧-脆性断裂带中赋矿部位所对应不同的构造环境(对应不同的动力学条件),划分了不同的金矿类型。同时,他们对韧-脆性断裂系统中与金成矿有关的成矿流体特征和成矿物质富集特征均提出了不同的看法。但对于两阶段的

转换机制(从韧性到韧-脆性、从压扭性到张扭性)、早期韧性剪切带对后期形成韧-脆性断裂带的贡献和构造驱动流体运移机制等缺乏系统研究。在胶东金矿的成矿动力学研究中,我们已得到早期韧性剪切阶段金元素趋向于更加分散,形成断裂带的雏形,为后期在此强变形带形成韧-脆性断裂奠定了基础,而晚期韧-脆性阶段的开放环境是金成矿的主要阶段的认识。翟裕生院士^[41-42]在研究山东焦家、阜山等矿床成矿过程时,认为成矿参数的临界转换现象是普遍存在的(图1)。在制约成矿临界转换的多种参数和多种形式中,构造动力转换可能起着根本的作用。

2 金成矿流体的研究

传统的矿床学研究主要侧重于对矿体及围岩(地层、构造、岩石、矿物和地球化学)的局限性研究。1980年代以来,国际学术界出现了一个研究流体作用的热潮,并经久不衰。流体研究对矿床学具有重要意义,流体可作为一根纽带把矿源层、矿化路径和矿体三者有机结合起来进行系统的成矿学研究。已有大量证据表明,地壳内部流体的活动范围极大,在深度上可延至上地幔,侧向上可迁移上千公里,这为矿床学研究开拓了思路。从矿

床学研究发展趋势看,从构造-流体角度研究矿床的形成过程及其空间分布规律已成为当今矿床学研究的热点之一^[43-46]。从目前成矿流体研究来看,大多数学者都认同成矿流体在金成矿过程中扮演着十分重要的角色,流体参与了金成矿的整个过程,其物理化学条件也发生变化。Samson^[47]在研究 Wawa 剪切带时,得出在断裂带从韧性到韧-脆性的演化过程中,流体的盐度下降(NaCl 18%—11%—更低),而碳同位素有升高的趋势。杨巍然等^[48]认为,不同性质断裂具有不同的流体包裹体组合,张性断裂流体包裹体数量多,粒径大,气液比变化范围大,常伴随出现沸腾包裹体群;压性断裂流体包裹体数量少,粒径小,具定向排列,深部以流体盐度大,CO₂大量出现为特色;韧性剪切带在深熔阶段以发育硅酸盐熔融包裹体和纯 CO₂ 流体包裹体为特色,包裹体数量少,均一温度高;脆性阶段包裹体组合特征与张性断裂相似。其他学者(何知礼,1982;卢焕章,1990;徐九华,1996;李培铮,1992;等)在这方面也开展了探讨性的工作,从宏观上提出了不同的流体成矿模式,这些大体可分为3类:(1)流体混合模型,认为深部热流体(高压)(包括剪切作用流体)沿陡倾韧-脆性断裂带上升,并与上部平流的低温流体(低压)混合,金发生沉淀并成矿;(2)流体-岩石作用模型,强调剪切作用热

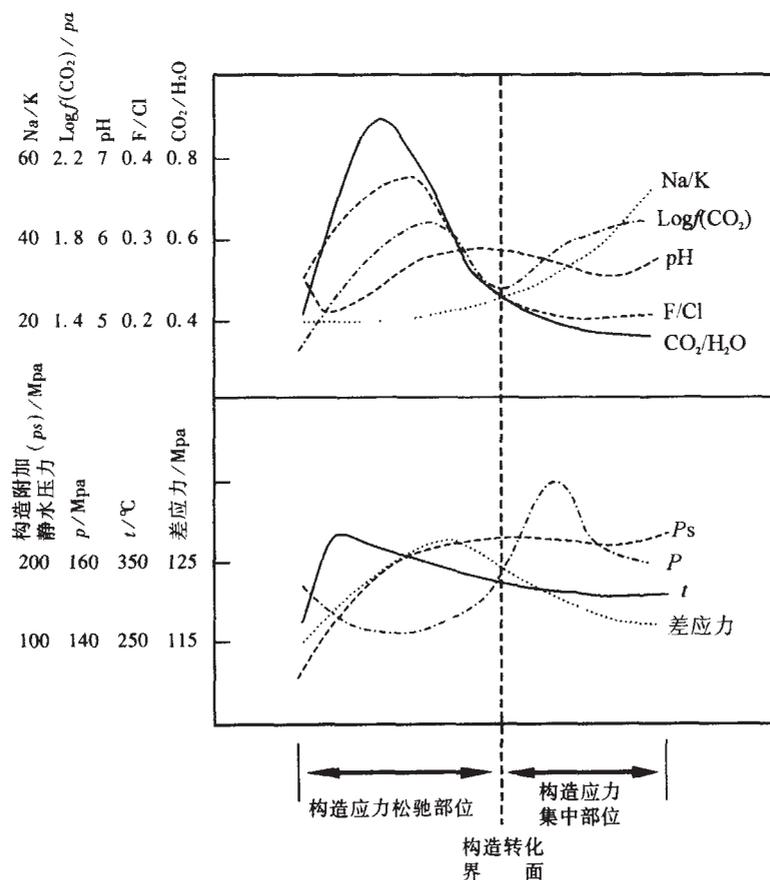


图1 山东阜山金矿床成矿物理化学参数临界转换图

(引自翟裕生, 2001)

Fig. 1 Critical transition of ore-forming physico-chemical parameters of Fushan gold deposit in Shandong Province

(after ZHAI Yu-sheng, 2001)

流体作为介质,与围岩发生化学交代,导致化学元素的带进带出,从而影响流体的化学平衡,成矿物质沉淀并成矿;(3)流体-构造成矿模型,认为断裂构造特别是剪切带为流体活动提供了空间,富含成矿物质的流体由下向上的迁移过程中,由于物化条件的改变,成矿流体失去平衡,金发生沉淀并成矿。同时,成矿流体研究对探讨其来源是一个有效的手段,前人在这方面也做过较多的工作。翟裕生教授认为整体构造背景下的局部转换(例如总体挤压背景下的局部拉张、总体拉张盆地中的局部封闭)是一种常见的矿源-运输-汇聚结构。在构造动力体制转换带动下,成矿流体的多种参数的联动转换是形成大型矿床的一种机制。但是,构造对流体的驱动机制,流体成分的变化特征、流体对成矿物质的溶解机制与溶解动力学条件、构造流体的成矿专属性及流体成矿过程中成矿物质的沉淀机制等未得到解决。流体的活动区间、运移路径等的研究也有待深入。

3 形变、相变与元素沉淀富集规律

构造作用引起岩石的形变相变,伴随蚀变和矿化作用,成矿流体的形成、物质成分的带入和带出、岩石/流体的相互作用、体积的变化等,这些方面的研究随地质找矿特别是物理化学找矿资料的积累而受到地质学家的关注,“构造地球化学”这一概论在近十几年逐步形成并发展,陈国达、杨开庆、黎彤、涂光炽、翟裕生、张本仁、赵伦山等从理论、实验和应用方面已积累了大量的资料。以断裂构造为例,主要研究:(1)断裂构造类型、蚀变矿化分带特征;(2)岩石形变特征、强度及其与相变的对应关系;(3)蚀变带微量元素丰度及其比值变化特征,元素带入带出特征;(4)稳定同位素、稀土元素分析,进行成矿物质来源研究等。对于韧性剪切作用是否成矿,不同的地质学家也提出了不同的看法^[49],一些学者认为韧性剪切作用直接控制成岩成矿,变形越强,矿化越好;另一些学者认为早期韧性剪切作用只是成矿作用的准备阶段,它控制区域上的金矿带,强调这一阶段主要形成成矿流体,而主成矿期为发生在后期的韧-脆性阶段,它控制金矿床和金矿体的产出特征;还有一些学者认为韧性剪切作用本身成矿的可能性不大,早期韧性剪切作用的成生温压条件较高,剪切带中金发生贫化,成矿期为发生在后期的韧-脆性阶段;也有学者认为韧性剪切作用和后期的韧-脆性阶段都发生成矿,只是形成不同的矿化蚀变类型。总的说来,大多数学者都认同晚期韧-脆性阶段在成矿中的重要性,但对两期变形在成矿中的内在联系并没有做详细的研究。

通过运动学、动力学和流体包裹体研究,探讨断裂构造从韧性到脆-韧性演化过程中的构造驱动流体成矿(metallogensis of tectonic driving fluid)系统的特征,建立含金韧-脆性断裂的成矿模型,丰富金成矿学的内容,这在寻找韧-脆性断裂型金矿盲矿及拯救危机矿山方面具有重要意义。

参考文献:

[1] Sibson R H, Francois R K. High-angle reverse faults fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposit [J]. *Geology*, 1988, 16: 551—555.

[2] Sibson R H. Structural and mechanics of fault zone in relation to fault-hosted mineralization[M]. Glenside: The Australian Mineral Foundation, 1989. 1—6.

[3] Sibson R H. Rustal stress, faulting and fluid flow[M]. Geological Society Publication House, 1994. 69—84.

[4] Ramsay J L, Huber M J. The technique of modern structural geology (Vol. 2 Folds and fractures)[M]. London: Academic Press, Inc. Ltd., 1987. 307.

[5] Ramsay J L. Shear zone geometry: A review [J]. *J Struct Geol*, 1980, 2: 83—99.

[6] Bonnemaïson M. “Filon de aurifere” an cas particulier de shear aurifere [J]. *Chron Rech Min*, 1986, 482: 55—66.

[7] Bonnemaïson M, et al. Auriferous mineralization in some shear-zone: A three-stage model of metallogenesis [J]. *Mineral deposit*, 1990, 25 (2): 96—104.

[8] Bonnemaïson M, Marcoux E. Les zones de cisaillement auriferes du socle hereynine francais [J]. *Chron Rech Min*, 1987, 488: 29—42.

[9] Cameron E M. Derivation of gold by oxidative metamorphism of a deep ductile shear-zone(Part I. Conceptual model)[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1989, 31: 135—147.

[10] Boutler C A, et al. The Golden Mile, Kalgornie: a giant gold deposit located in ductile shear zones by structurally induced infiltration of an auriferous metamorphic fluid[J]. *Economic Geology*, 1987, 82 (7).

[11] Reinnard M C, Davison I. Structural and lithological on gold deposition in the shear zone-hosted Fazenda Brasileiro Mine, Bahia State, Northeast Brazil [J]. *Economic Geology*, 1990, 85: 952—967.

[12] Vityk M O, Krouse H R, Skakun L Z. Fluid evolution and mineral formation in the Beregov gold-base metal deposit, Transcarpathia, Ukraine [J]. *Economic Geology*, 1994, 89: 547—563.

[13] Kisers A F M, Kolb J, Meyer F M. Gold mineralization in high-grade metamorphic shear zones of the Renco Mine, Southern Zimbabwe [J]. *Economic Geology*, 1998, 93: 587—601.

[14] Ricardo D, Presnell W, Parry T. Geology and geochemistry of the Bameys Canyon gold deposit, Utah[J]. *Economic Geology*, 1996, 91: 273—288.

[15] 邓军, 翟裕生, 杨立强, 等. 论剪切带构造成矿系统[J]. *现代地质*, 1998, 12(4): 493—500.

[16] 邓军, 杨立强, 孙忠实, 等. 剪切带成矿动力机制与模式[J]. *现代地质*, 1999, 13(2): 125—129.

[17] 李德威. 含金剪切带的类型划分及成矿机理[J]. *矿床地质*, 1993, 12(2): 148—155.

[18] 王鹤年, 等. 广东河台糜棱岩型蚀变岩型金矿床的地球化学研究[J]. *矿床地质*, 1989, 8(2).

[19] 王吉君, 余和勇. 玲珑金矿田花岗岩中韧性剪切带与成矿的关系[J]. *矿床地质*, 1990, 9(3): 231—242.

[20] 许志琴. 韧性剪切带的基本特征及研究方法[A]. 见: 板快构造基本问题[C]. 北京: 地震出版社, 1986.

[21] 孙胜龙. 夹皮沟韧性剪切带与金矿富集规律研究[J]. *黄金*, 1990, 11(7): 6—10.

[22] 孙承轅, 张全春. 江西金山金矿韧性剪切过程中的物质交换[J]. *矿床地质*, 1994, 13(4): 371—379.

[23] 季俊峰, 孙承轅, 郑晴. 江西金山剪切带型金矿床中含金石英脉的

- 成矿特征[J]. 地质论评, 1994, 40(4): 361—367.
- [24] 舒斌, 郭涛, 吕古贤, 等. 构造应力对焦家金矿的成矿控制[J]. 现代地质, 1999, 13(4): 425—431.
- [25] 张臣, 朱亮. 内蒙古某金矿韧性剪切带及其与金矿化的关系[J]. 河北地质学院学报, 1994, 17.
- [26] 杨元根. 剪切带、糜棱岩与金矿关系的研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1995, (4): 267—271.
- [27] 林传勇, 何永年, 陈孝德. 韧性剪切带与金矿化关系[J]. 中国科学 B 辑, 1994, 24: 1222—1232.
- [28] 陈柏林, 董法先, 李中坚. 韧性剪切带金矿成矿模式[J]. 地质论评, 1999, 45(2): 186—192.
- [29] 赵志忠, 李志纯. 地壳内部流体与金成矿关系的研究现状与进展[J]. 地质地球化学, 1999, 27(2): 76—82.
- [30] 冯建忠, 邵世才, 汪东波, 等. 陕西八卦庙金矿脆—韧性剪切带控矿特征及成矿构造动力学机制[J]. 中国地质, 2002, 29(1): 58—66.
- [31] 张连昌. 韧性剪切带动力学特征及其控矿作用研究进展[J]. 地质与勘探, 1999, 35(2): 13—20.
- [32] 朱世戎. 河北大营子金矿成矿机理及找矿标志[J]. 矿产与地质, 2000, 6.
- [33] 刘文灿, 杜建国, 张达, 等. 淮阳构造带老湾金矿区构造与成矿作用的关系[J]. 现代地质, 2003, (1).
- [34] 匡文龙, 刘继顺, 朱自强, 等. 新疆西昆仑地区库斯拉甫金矿成矿作用新认识[J]. 黄金, 2002, (11).
- [35] 马长源. 河南桐柏县银洞坡金矿地球物理特征[J]. 物探与化探, 2002, (6).
- [36] Robert F, Boulier A M, Firdaus K. Glod-quartz veins in metamorphic terranes and their bearing on the role of fluids in faulting[J]. Journal of Geophysical Research B, 1995, 100(7): 12861—12879.
- [37] 何绍勋. 有关剪切带及其成因的述评[A]. 见: 中国地质学科发展的回顾——孙云铸教授百年诞辰纪念论文集[C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1995. 104—109.
- [38] 何绍勋, 段嘉瑞, 刘继顺, 等. 韧性剪切带与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1996. 1—186.
- [39] 沈保丰, 毛德宝, 李俊健. 绿岩带金矿床[A]. 见: 张贻侠, 等编. 中国金矿床 进展与思考[C]. 北京: 地质出版社, 1996. 78—85.
- [40] 陈柏林, 陈宣华, 王小凤, 等. 阿尔金北缘地区韧性剪切带型金矿床构造控矿解析[J]. 地质学报, 2002, 76(2).
- [41] 翟裕生, 邓军, 丁式江, 等. 关于成矿参数临界转换的探讨[J]. 矿产地质, 2001, 20(4): 301—306.
- [42] 翟裕生. 构造—流体—成矿作用研究的几个问题[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 230—236.
- [43] 於崇文. 成矿作用动力学——理论体系与方法论[J]. 地学前缘, 1994, 1(3): 54—82.
- [44] 贾跃明. 流体成矿系统与成矿作用研究[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 253—258.
- [45] 贾跃明. 地壳规模流体的远距离运移不断得到证实[J]. 地学前缘, 1996, 3(3): 18.
- [46] 何知礼, 杜加峰. 流体包裹体研究的某些进展与发展趋势[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 306—312.
- [47] Samson I M, Bas B, Holm P E. Hydrothermal evolution of auriferous shear zones, Wawa, Ontario[J]. Economic Geology, 1997, 92: 325—342.
- [48] 杨巍然, 张文淮. 断裂性质与流体包裹体组合特征[J]. 地球科学, 1996, 21(3): 285—290.
- [49] 徐九华, 何知礼, 谢玉玲. 绿岩型金矿床成矿流体的地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1996.

THE ORE-FORMING MECHANISM OF CRITICAL TRANSITION IN ORE-BEARING DUCTILE-BRITTLE FRACTURES

SHU bin

(Development and Research Center, CGS, Beijing 100037, China)

Abstract: By the study on ancient stress, fluid inclusions and composition of tectonites and structural ores from gold deposits, the ore-forming mechanism of critical transition in ore-bearing ductile-brittle fractures is analyzed, involving the metallogenic dynamics, fluid evolution and the structural mechanism during the evolving process of fractures from ductile to brittle natures. It is concluded that the development of the fractures is also the process of ore-forming matter gathering and enriching, with corresponding change in the composition of ore-forming fluids.

Key words: fracture; ore-forming; critical transition

作者简介: 舒斌(1967—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事金矿地质、矿田构造、成矿规律研究, 通讯地址: 北京市西城区阜外大街 45 号 中国地质调查局发展研究中心, 邮政编码 100037.