

韧性剪切带中的脆性构造及其对金矿化的控制^{*}

孙 晓 明

(中山大学地球科学系, 广州 510275)

摘 要 韧性剪切带是金矿床的最主要赋存体之一, 但其中的金矿化主要与脆性断裂有关. 将剪切带中脆性构造分为同期和后期 2 类, 详细阐述了其各自成因和特征, 并重点探讨了同期脆性构造对金矿化的控制机制, 指出同期脆性构造与主剪切带之间的周期性短暂物理化学势差导致成矿流体向前者汇聚, 而流体温 (T)、压 (p) 的下降及不混溶气相的分离则引起矿质沉淀.

关键词 韧性剪切带, 同期脆性构造, 后期脆性构造, 金矿化

分类号 P 61

韧性剪切带中金矿的成矿机制是目前地学界十分重要的研究课题, 因为金矿特别是太古代地体中的金矿绝大多数受到韧性剪切带的控制, 但金矿成矿机制方面还有许多问题未能很好地解决. 例如, ① 相当多的剪切带型金矿实际上并不直接赋存在剪切带的糜棱岩系列岩石中, 而主要赋存在剪切带的次级裂隙或脆性构造中^[1,2] (图 1), 其原因何在? ② 并非所有韧性剪切带均发育金矿, 只有那些介于韧性和脆性之间的韧脆性剪切带才最有利于成矿, 其原因何在? ③ 韧性剪切带的规模有时很大, 如西澳 Kalgoorlie 金矿区剪切带长达 50 km, 宽达 2 km^[3]; 我国夹皮沟金矿带北西向剪切带长逾 30 km, 宽逾 1 km; 加拿大 Hemlo 金矿剪切带长达 11 km, 宽达 10 km^[4]; 丹东四道沟金矿区剪切带长逾 40 km, 宽达 10 km 等, 在韧性构造变形所波及的数十、甚至数百 km² 范围内, 金矿到底在何处富集?

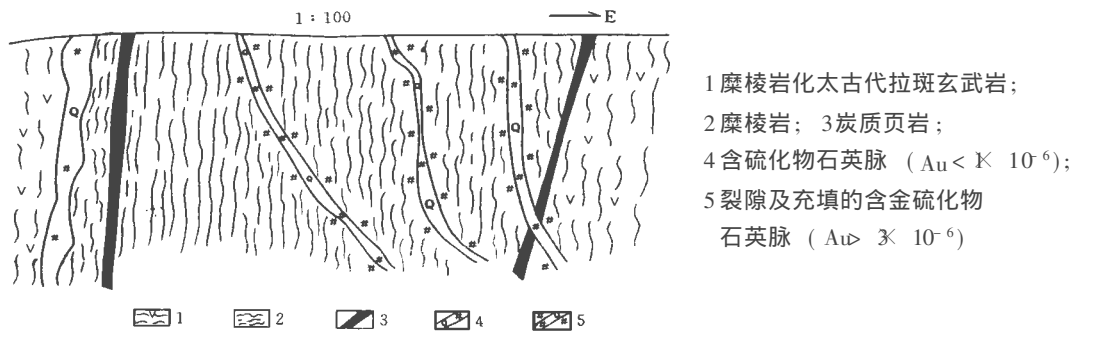


图 1 西澳 New Boddington 金矿剖面地质图

Fig. 1 Geological profile for New Boddington gold mine, western Australia

^{*} 国家自然科学基金资助 (9488010) 项目

收稿日期: 1997-04-07 孙晓明, 男, 34 岁, 博士, 教授

本文对这些重要问题进行了初步探讨, 认识到韧性剪切带中的脆性构造 (或称扩容构造) 对金矿的成因有重要的控制作用, 有必要认真探讨其成因及其对金矿化的控制机理。

1 韧性剪切带中的脆性构造

韧性和脆性构造变形之间存在本质的差别: 韧性变形以连续的塑性流变为特征, 其主要变形机制包括晶体塑变、质量传递 (如扩散、压溶等) 和晶界迁移 3 种^[5], 变形产物为糜棱岩系列岩石; 而脆性变形则以不连续破裂为特征, 其产物是各类碎裂岩。大量证据显示这 2 种构造变形及产物可在同一构造带中共生, 韧性剪切带中的脆性构造可分为同期和后期脆性构造 2 种。

1.1 同期脆性构造

此类构造源自韧性剪切带形成过程中与韧性变形同时形成和有成因联系的脆性变形, 其形成方法及种类有多种, 因为影响岩石变形的因素很多, 如温度 (T)、围压 (p)、差异应力 ($\Delta \epsilon$)、应变速率 ($\dot{\epsilon}$)、流体相压力 (p_f) 等。一般说来, $\dot{\epsilon}$ 、 p_f 及 $\Delta \epsilon$ 的升高导致岩石脆性破裂, 而 p 及 T 的上升导致岩石韧性增加。此外, 造岩矿物的滑移系及粒度也是重要因素, 矿物滑移系的减少及粒度的增加使岩石易于脆性变形。在上述复杂因素中, 流体相压力 p_f 的变化至关重要, 这是因为韧性剪切变形中一般伴随着大量 H_2O 、 CO_2 等流体活动及强烈的水/岩反应^[6]。剪切带可影响到下地壳甚至上地幔, 大型的剪切带中常出现幔源碳酸盐蚀变矿物。煌斑岩及斑岩等即为例证^[1], 而在下地壳电磁测声所显示的低电阻层表明了连续含水层位的存在^[7], 同时上地幔中也存在以 CO_2 和 H_2O 为主体的 C-O-H 系统非硅酸盐流体^[8]。剪切带在切割到这些流体丰富的层位时, 将这些流体带到地壳上部, 同时会导致其中流体压力 p_f 的升高。当 $p_f \geq p_{\text{岩石最小围压}} (\epsilon_3) + \text{岩石抗张强度} (V)$ 时, 即会引起岩石 ϵ_3 方向上脉状水压破碎, 形成脆性构造。如果 p_f 等于或超过岩石最大主压力 (ϵ_1) 和 V 之和时, 则会形成三维水压碎裂, 这样就使韧性变形向脆性形变转化。宏观上, 不同岩性接触带, 剪切带的膨胀及弯曲等部位, 一方面由于岩石的应变速率差异会导致脆性碎裂及扩容带的形成, 同时也是易受到高压流体在剪切中破坏的部位。

除了 p_f 变化导致的脆性碎裂外, 还存在着其它几种与流体关系不密切的脆性构造: ① 较软的糜棱岩基质中硬矿物碎斑的破裂和拉断, 这些破裂主要发生于硬矿物的直径最大处^[5]; ② 矿物膝折形成的微裂隙, 基本上与最大主应力平行, 且在连续变形时会因晶界迁移效应而趋消失^[9]; ③ 剪切带中高应变带或亚剪切带两侧形成的微裂隙。亚剪切带中矿物较其周围矿物变形和细粒化速度快, 从而在其一侧或两侧因变形不均而形成微裂隙, 它们一般位于剪切带中部, 且与剪切带剪切方向近平行; ④ 剪切带内部 R-P 构造中, R 面往往形成细裂隙; 因 P 面上的压应力 ϵ_{PN} 远大于 R 面上的压应力 ϵ_{RN} (图 2), 因此 R 面易于发生脆性破裂^[9]。此外, Etheridge 等^[10]对韧性变形中沿剪切方向的膨胀部位、割阶及剪切带弯曲部分的扩容构造进行了研究, Hodgson (1989) 详细探讨了韧性变形中引起扩容或膨胀作用的 6 种可能机制。

剪切带的同期脆性构造具有下列主要地质特征: ①

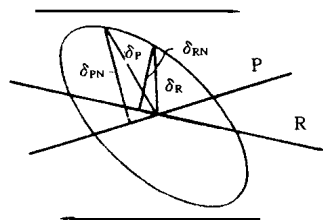


图 2 剪切带 R-P 构造的应力椭圆图

Fig. 2 Strain ellipse of R-P

structure in shear zone

一般与剪切方向相平行或以较小角度相交, 即使在形成时与剪切方向夹角较大者 (如 R-P 构造中的 R 面等), 随着剪切作用增强, 亦会趋向与剪切带相平行, 特别是夹角 $< 45^\circ$ 者; ② 其赋存部位有一定规律, 主要赋存在剪切带最中部或高应变带 (亚剪切带) 的两侧, 剪切带弯曲及膨胀部位, 以及不同岩性交界处等, 个别地区在剪切带两侧亦见^[1]. ③ 其中往往充填含金硫化物石英脉, 且矿物中气液包裹体研究表明其成矿流体主要来自地壳深部, 但常有大气降水加入. ④ 受连续剪切作用影响, 早期形成的脆性构造及其中充填物变为顺片理的富石英和硫化物糜棱岩带, 与周围糜棱岩过渡, 而较晚者及其中充填物在显微镜下出现波状消光及核幔构造等.

1.2 后期脆性构造

后期脆性构造是指剪切带形成以后叠加上去的脆性构造, 它们与剪切带无成因上的联系. 其成因亦很复杂, 如地震及岩浆岩的侵入和上拱等都可形成. 这类脆性构造主要有下列特征: ① 与剪切带面理夹角不确定, 但一般呈较大角度相交, 有时呈共轭碎裂岩带出现, 如新疆中天山乔尔山金矿所见 (图 3). ② 可切割剪切带中任何糜棱岩系裂岩石, 表明其形成较剪切带为晚. ③ 其中充填物较复杂, 大量出现低温条件下沉淀的方解石等矿物, 且矿物颗粒较粗大, 包裹体成分分析显示其中流体主要是大气降水.

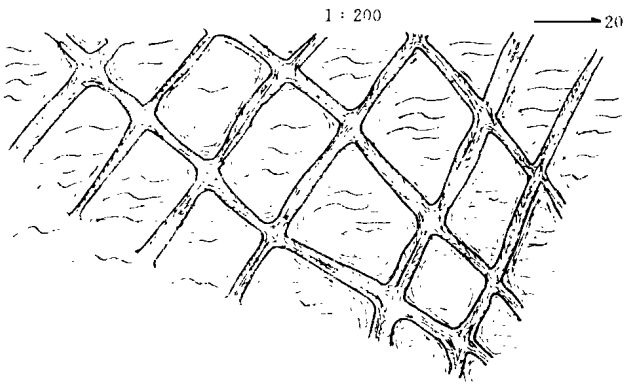


图 3 新疆中天山乔尔山金矿北部推覆剪切带中后期共轭脆性断裂岩性为糜棱岩化闪长岩, 岩体时代为燕山期, 脆性断裂中已发生微弱的金矿化

Fig. 3 Sketch of tessellated structure composed of two conjugate post-deformational brittle faults developed in nappe shear zone of northern Qiaogashan gold deposit located at Central Tianshan area, Xinjiang, China

2 脆性构造对金矿化的控制机理

2.1 同期脆性构造

大量的研究已证实, 与金矿有关的剪切带中流体主要为 C-O-H 体系, 且其中 CO_2 和广泛的碳酸盐蚀变矿物 $\text{W} (^{13}\text{C})$ 和 $\text{W} (^{18}\text{O})$ 分析显示了流体中碳质的幔源特征^[1]. 在上地幔非硅酸盐流体相中, CO_2 和 H_2O 是最主要组份, 此外, 还含有 CH_4 , N_2 , NH_3 , SO_2 , H_2S , F 及 Cl 等组份. 在上地幔温度和压力条件下, H_2O 的主要载体矿物是角闪石和金云母, 而 CO_2 的主要载体为白云石和菱镁矿, 但在上地幔顶部 (33~ 66 km 深处), 由于 CO_2 载体矿物的不能稳定存在和几乎所有 H_2O 均进入角闪石, 流体相强烈富集 CO_2 , 而 H_2O 很贫^[8], 因此, 剪切带流体中 CO_2 可大量来自上地幔, 而 H_2O 则只能来自地壳或大气降水. 流体在韧性变形过程中与糜棱岩系列岩石发生强烈的水-岩反应, 如斜长石的绢云母化, 暗色矿物的绿泥石化, 同时伴有强烈的碳酸盐化等, 释放出大量 SiO_2 ^[6]. 这些 SiO_2 在流体中主要以胶体态存在, 并使 Au 在热液中溶解度升高 (Herrington, 1993), 有利于流体从围岩中汲取大量成矿元素. 而流体含 Au , 特别是 Au 以金氯络合物迁移时 (在温度 $\geq 350^\circ\text{C}$, $\text{pH} <$

4条件下, Au主要以 AuCl^- 形式迁移), SiO_2 的溶解度会明显升高 (Fan W L, 1988). 在韧性变形过程中, 当含 H_2O , CO_2 , SiO_2 , Au 络合物及其它微量挥发性组份的流体压力 p_f 因流体不断汇聚而 $\geq$ 岩石围压 p_c 岩石抗张强度 V 时, 或其它前文所讨论的脆性变形条件为剪切带所满足时, 岩石即发生脆性碎裂. 由于脆性构造与主剪切带之间存在的短暂压力势差, 成矿流体向脆性构造中迅速汇聚, 使其中水/岩比值达到剪切带中最高值, 而流体 p_f 和温度 T 在脆性构造中的降低会产生 2 种效应: ① 导致溶液中 SiO_2 溶解度下降, 并进而降低 Au 在热液中溶解度; ② 使得 CO_2 , CH_4 , H_2S 及 H_2 等微量气相从流体中分离出来, 形成不混溶相, 此过程并不会显著降低流体温度, 因为 CO_2 的摩尔熵远较 H_2O 为低, 但一些微量气相如 CH_4 , H_2S 等的析出会使流体趋于氧化, 从而使金的络合物, 特别是金氯络合物不稳定. 2 种效应的综合结果是导致 SiO_2 胶体和金矿物的大量沉淀. 胶体状 SiO_2 在很短时间内 (数天内) 即会发生重结晶作用, 形成含金石英脉 (Herrington, 1993). 这些脆性构造是剪切带中软弱面, 当其中流体 p_f 因沉淀矿物阻塞或剪切带中流体进一步汇聚而升高时, 会再次发生岩石脆性破裂的扩展, 重复前文所述成矿过程, 这种过程也可用岩石变形过程中流体的震动—泵汲 (Sibson, 1975) 和破裂—充填理论 (Ramsay, 1980) 来解释.

2.2 后期脆性构造

此类脆性构造一般会对剪切带中先存金矿起破坏作用, 但如果其成因与岩体的上拱和侵入有关, 则有时会对先存的金矿体起叠加富集作用, 这种情况在华北地台上许多地区都存在 (Sun X M, 1992), 这是因为华北地台太古代地体中许多地区金矿化主要由 2 期组成: 早期者主要与剪切带中同期脆性构造有关, 而晚期者则主要与侵入于剪切带中或边部的中生代长英质岩浆有成因联系, 这些岩体及其伴生的后期脆性构造对早期金矿进行了较强烈的叠加富集作用, 出现大量贱金属硫化物及成色较低的金矿物等. 这些金矿的成因目前尚少有人注意.

3 结 论

(1) 韧性剪切带中存在同期和后期 2 类脆性构造, 两者的成因及特征均有所不同.

(2) 同期脆性构造与主剪切带之间的物理化学势差导致流体向脆性构造汇聚, 而流体 p_f 和 T 的下降及不混溶微量气相的分离导致矿质在脆性构造中沉淀; 后期脆性构造一般对剪切带金矿起破坏作用, 但当其成因与晚期岩浆活动有关时, 有时会对先存金矿起叠加富集作用.

参 考 文 献

- 1 Eisenlohr B N, Groves D I, Partington G A. Crustal-scale shear zones and their significance to Archaean gold mineralization in Western Australia. *Mineral Deposita*, 1989, 24 1~8
- 2 Groves D I, Ho S E, McNaughton H J, et al. Genetic models for Archaean lode-gold deposits in western Australia. In: Ho S E, ed. *Advances in understanding Precambrian gold deposits*, Vol 2. Perth: The University of Western Australia Publication, 1988. 1~22
- 3 Mueller A G. Structural control of greenstone-hosted gold mineralization by transcurrent shearing: a new interpretation of the Kalgoorlie mining district, western Australia. *Ore Geology Reviews*, 1988, 3 359~387
- 4 Hugon H. The Hemlo gold deposit, Ontario, Canada: a central portion of a large scale, wide zone

- of the heterogeneous ductile shear. Toronto: Proceeding of Gold '86 Symposium, 1986. 379~ 387
- 5 White S H. Brittle deformation within ductile fault zones. Moscow: Proceedings of 27th International Geological Congress, 1984. 327~ 350
- 6 Sun X M, Xu K Q, Ren Q J, et al. Water-rock interactions and chemical components variations during ductile deformation of NW-striking shear zone in Jiaogou gold belt, China. Chin J Geochemistry, 1996, 15 (4): 331~ 343
- 7 Nakut A. Deep crustal electrical conductivity: evidence for water in the lower crust. Geophysics Research Letter, 1997, 4: 239~ 242
- 8 Watson, E B, Brenan J M, Baker D R. Distribution of fluids in the continental mantle. In: Menzies M A, ed. Continental mantle. London: Oxford Science Publications, 1990. 111~ 126
- 9 Shi H S. Analysis of intergrowth of ductile and brittle deformations. Chin Sci Bull, 1990, 35 (21): 1812~ 1815
- 10 Etheridge M A. Structural control of regional metamorphic mineralization and its application to Archaean gold deposits. Kalgoorli: Symposium of Second Eastern Goldfields Geological Field Conference, 1987. 1~ 7

Two Kinds of Brittle Structures in Ductile Shear Zone and Their Controlling Significances for Gold Mineralization

*Sun Xiaoming**

Abstract Ductile shear zone is one of the most important hosts of gold deposit. Studies show that the gold mineralization occurred in shear zones is mainly related to brittle structures, but little attention has been paid to the reasons. Two kinds of brittle structures within the shear zones, syn- and post-deformational, have been divided, and their respective features and genesis have been deciphered. With the attention focused on the controlling mechanism of syn-deformational brittle structures during the gold mineralization, we propose that it's the periodic and transient physical and chemical potential differences between the syn-deformational brittle structures and the shear zone leads to the accumulation of ore-forming fluids in the syn-deformational brittle structures. On the other hand, the decline of temperature (T) and pressure (P) of ore-forming fluids and the separation of immiscible minor gas species result in the deposition of ore-forming materials.

Keywords ductile shear zone, syn-deformational brittle structure, post-deformational structure, gold mineralization

* Department of Earth Sciences, Zhongshan University, Guangzhou 510275