

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

韧性剪切过程中金沉淀富集的新机制

王玉明

(山西大学师范学院地理系, 太原, 030012)

内容提要 一般认为,金的沉淀是因为成矿热液在宏观上已达到金络合物失稳、分解的条件。笔者认为金在黄铁矿、毒砂等硫化物矿物中富集的原因,是这些矿物生长时造成了在其生长面附近的微区内会出现 E_h 值及(或) S^{2-} 、 $[AsS]^{3-}$ 等浓度的局部降低,以致引起了金络合物在此微区内的失稳、分解,分解出来的金将就近附着在矿物的生长面上及随后被包围。成矿热液此时在宏观上不一定已达到金络合物的分解条件。韧性剪切过程中石英普遍会产生压电效应,它会造成石英颗粒一侧表面及其附近出现局部负电荷集中的强还原环境,及在某些相邻石英颗粒之间诱生电子发射,从而能有效地促使热液中金络合物的还原分解,释出的金将就近附着在石英晶间和颗粒表面上。该机制对金的富集作用是与韧性剪切作用同时进行的,且在剪切带内应变最强的部位应具有最大的富集作用强度。笔者从石英具有高达 573°C 的压电效应上限温度推测,在地壳较深部位的韧性剪切带中,压电效应富集金的机制仍会起作用,此可作为韧性剪切带型金矿向深部找矿的理论依据。

关键词 韧性剪切带 金 成矿机制 晶体生长 压电效应

自80年代以来,已发现许多大型及超大型金矿床产于不同时代的韧性剪切带中,被称为韧性剪切带型金矿床。对这类矿床的研究和找矿,十几年来一直是全球性的热点课题。业已查明,不同级次的脆—韧性剪切带控制着韧性剪切带型金矿床(矿带、矿田)的形成和分布^[1,2],甚至发现剪切带中应变最强^[3]或应力最集中^[4]的部位恰是金品位最高的部位,金的含量与应变强度或应力集中程度正相关。故不少学者认为韧性剪切作用与金的成矿是相依相伴、同时进行的,韧性剪切作用本身促成了金的迁移、富集并使之成矿^[5,6],在实验上对此也曾进行过验证^[7]。然而,虽然韧性剪切作用形成的剪切带已为含金流体的运移提供了通道,但导致金在剪切带中沉淀、富集的原因和机制,特别是金在石英晶隙、裂隙中赋存富集的机制尚不清楚。这使得已有的成因模型均缺乏足够的说服力。本文拟给出并论证一种新的成矿机制。

1 对韧性剪切成矿作用已有模式的评述

韧性剪切带型金矿的成矿作用是在热液的参与下进行的。韧性剪切作用起码已为含金热液的运移准备了通道——剪切带。深部热源的存在及(或)地热梯度促进了流体的循环对流。流体的通量^[8]、含金量及流体通过剪切带时其携带的金被剪切带滞留的多寡应可决定金矿可否形成及其规模和品位。流体通过剪切带时其流量的分布及剪切带各部位的岩石成分和构造条件,决定了即使在同一剪切带中,各处的含金情况也会差异悬殊。只是还不很清楚,含金流体通过剪切带时,所携带的金是如何被滞留下来的?

注:本文得到南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室资助。

本文1998年3月收到,5月改回,章雨旭编辑。

在金以络合物形式运移的情况下,金络合物的失稳是金矿物得以生长的前提条件。当金络合物由于外界物理化学条件的变化而变得不稳定并发生分解时,分解还原出来的金原子会相互凝聚形成金颗粒或金胶体的胶核或在晶核上沉淀长大。如果金是以金胶体的形式运移的,则金颗粒的沉淀就是金胶体的沉聚,它显然与金胶体的稳定性有关。可见金矿物的生长是受成矿热液的组分、温度、压力、酸碱度(pH)及氧化还原电位(Eh)等物理化学条件的变化控制的^[9~12]。这里的物理化学条件变化既可以是宏观的——发生于整个或大范围的热液系统中,也可以是微观的——仅发生于局部小环境内。

传统的热液成矿理论^[9~11]强调宏观物理化学条件的变化在成矿过程中的作用。将其应用到韧性剪切带的成矿作用中,M. Bonnemaison 等^[13]提出了著名的三阶段成因模型。该成因模型将剪切带中的金矿化分为三个阶段,并暗示早期阶段是由于含矿热液宏观物理化学条件的变化导致了金络合物的分解和金的沉淀,即发生金矿化,且认为该阶段沉淀的金几乎是剪切带中金的唯一来源;中期阶段只是形成微砂糖状石英,并有含金硫化物的溶解及将其中所含的金转移至微砂糖状石英中;部分区域内发育的晚期阶段则仅发生金矿化的原位重新活化。R. H. Sibson 等^[14]则提出了断层阀模式,认为在地下约 10 km 左右的脆—韧性剪切转换带,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石英及其他矿物的溶解度并导致矿物和金的沉淀。沈保丰等^[15]则认为脆—韧性剪切过渡带是地壳中重要的物理化学条件转变带,该带以下的岩石渗透率低,其上却较高,因而过渡带下部的流体通过构造应力、断层泵吸力和地热梯度或岩浆热加热上升,并在过渡带内自由对流,而过渡带以上主要是天水下渗,两种性质和温度不同的流体在过渡带内发生混合,从而造成含矿流体失稳沉淀。

上述几种模式虽然在具体机制上有所差异,总体上却有一个共同点,即都认为是成矿热液宏观物理化学条件的改变引起了热液中金络合物的失稳、分解和金的沉淀。不同之处只在于对哪一个或哪几个宏观物理化学条件发生了改变以及导致其改变的原因看法不一。但是,由成矿热液宏观物理化学条件的改变所引起的金络合物的分解应使同时生长的各种矿物具有相同或相近的含金量。热液型金矿床中普遍出现的相反情况,即金主要在少数几种硫化物矿物中富集的事实表明,传统的热液成矿理论^[9~11]不适用于含金热液的成矿作用,因而更不能用于指导对韧性剪切作用成矿的认识。

2 金在硫化物矿物中富集的原因及机制

热液型金矿床中金一般以自然金形式出现,其品位大致为 10^{-6} 量级。因而在含金热液的沉淀过程中,脉石矿物和金的载体矿物扮演着主导角色,金只应是沉淀过程的副产品。也即成矿热液宏观物理化学条件的改变只是导致了脉石矿物和金的载体矿物的沉淀,金则只应是在其载体矿物沉淀生长的过程中由于某种原因而进入或富集于这些矿物中的。由于金在其载体矿物中并非以类质同象的形式存在^[16~18],故这些金不可能是由于类质同象的原因而富集于载体矿物(主要为硫化物矿物)中的。载体矿物沉淀生长时所造成的在其生长面附近的微区内会出现局部物理化学条件的异常变化应是导致金进入载体矿物的根本原因。在这些物理化学条件发生了异常变化的微区内,金络合物会发生分解或更易于分解,分解还原出的金会相互凝聚成金颗粒并将就近附着在这些矿物的生长面上或进入矿物中,而金颗粒继续长大^[12]。成矿热液此时在宏观上并不一定已达到了金络合物的分解条件,仅须达到硫化物矿物的生长条件。也即宏观物理化学条件只起着背景条件的作用,当其变得越接近或有利于金络合物分解的条件

时,微区内金络合物的分解量就会越大。但即使宏观物理化学条件没有发生变化,只要微区内的物理化学条件异常变化的幅度足够大,微区内金络合物的分解仍会进行。

对于金络合物的分解和金在其载体矿物中富集的具体机制,笔者总结为两点^[12]:

(1) 在适宜于毒砂、黄铁矿及磁黄铁矿等晶格中存在 Fe^{3+} 离子之矿物生长的宏观物理化学条件下,这些矿物生长时由组分扩散会造成其生长面附近微区内 Fe^{3+} 离子浓度的降低,在此微区内的 $[\text{Fe}^{3+}]/[\text{Fe}^{2+}]$ 活度比相对较低,形成了一个 Eh 值较小的微还原区。由于金络合物的分解反应为获取电子的还原过程,它们在上述微还原区内将易于进行。分解还原出的金会凝聚成金颗粒或金胶核,并将就近附着在这些矿物的生长面上,金原子也可在自然金的晶核或金胶核上沉淀长大,从而导致金富集于这些矿物中。

(2) 在有利于黄铁矿、毒砂等矿物生长的宏观物理化学条件下,由于这些硫化物矿物在生长过程中需消耗热液中的硫和(或)砷组分,从溶液到这些矿物晶体生长面的体积扩散将产生硫和(或)砷的浓度梯度,生长面附近的硫和(或)砷浓度会低于溶液中的同组分浓度。因而随着这些矿物的生长, $\text{Au}[\text{HS}]^{2-}$ 、 $\text{Au}[\text{AsS}_3]^{2-}$ 等络合物将易于在它们的生长面附近分解,进而导致金在这些矿物中富集。

3 金在微砂糖状石英中富集的机制

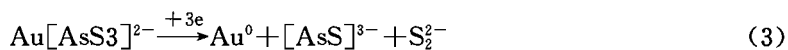
正如 M. Bonnemaïson 所指出的,金以两种方式存在于含金剪切带内:一是赋存在硫化物内,二是赋存在微砂糖状石英内^[5]。前文已论述金在硫化物矿物中富集的机制,下面探讨金在微砂糖状石英中富集的原因。

M. Bonnemaïson 观测到金赋存于微砂糖状石英内是含金剪切带的一种普遍现象,但指出必须伴有硫化物,哪怕是存在极少量的硫化物(有时 $<1\%$),金以微米级颗粒云分布在硫化物小晶体内或其附近,微粒云分布范围可达数毫米。微粒云中的金颗粒位于石英粒间。他对此的解释是:在由石英糜棱岩或 SiO_2 凝胶体组成的微孔隙硅质介质中,硫化物晶体有可能产生一种直径约为数毫米的微小环境,它能促使热液释出的金在这里沉淀下来,并因而认为只要微孔隙介质一直保持存在,也即在剪切带的整个活动期内,金矿化或金的沉积就会持续进行并积聚起来^[5]。看上去这与生长着的硫化物矿物其生长面附近会出现物理化学条件的异常变化^[12]相类似。但这种解释无法说明为什么在广东河台金矿区会有 $50\% \sim 70\%$ 或 51.6% ^[19] 的金嵌布于微砂糖状石英晶隙及裂隙中,却在金粒周围明显缺乏硫化物相^[3]。似乎用下述过程也可大致地说明金在微砂糖状石英中富集的原因:剪切带内早期形成的和(或)期间不断形成的含金石英脉被后继韧性剪切作用压碎,石英破裂成微砂糖状,含金硫化物被溶解,其所含金因高度稳定及具有延展性的特点而留于剪切带内并被转移至微砂糖状石英中,不断地重复该过程似可导致金在微砂糖状石英中富集。若果真如此,则剪切带的体积亏损^[20]也是有利于金富集的因素。但是,这种解释对于广东河台金矿而言仍不适合,因其早期阶段及早中期阶段分别形成的是以动态重结晶石英为主的金-石英矿化和金-硅化^[3,19],没有或极度缺乏硫化物。剪切带内的硫化物矿物是后期叠加上去的^[3]。在这种缺少硫化物参与的情况下,金又是如何富集到石英中去的呢?

笔者认为,韧性剪切作用过程中石英晶体的压电效应是导致金在微砂糖状石英中富集的主要原因。 α -石英是自然界唯一的常见压电矿物,也是韧性剪切带中含量最多的矿物,微砂糖状石英即为 α -石英。但其压电效应从未被真正考虑过会导致金的沉淀,只有刘继顺^[1]曾笼统地

提到过热电、压电、摩擦电有利于金的沉淀富集。 α -石英属于无对称中心晶体,其硅氧四面体沿 C 轴对 Z 平面的投影是个梯形,每个硅氧四面体单元沿它的 X 轴方向具有电矩,在应力作用下,晶体结构产生形变,系统中的电矩失去平衡,出现压电极化,又称压电效应。研究表明^[21], α -石英晶体在应力作用下产生压电极化或极化电荷的方向是 X 轴(2 度轴)和 Y 轴方向,沿 Z 轴(3 度轴)不会产生压电极化。沿 X 轴或 Y 轴方向上的正应力(T1 或 T2)或对晶体施加 T4 切应力均只能在 X 轴方向上产生极化电荷;对晶体施加切应力 T5 和 T6 则只在 Y 轴方向上产生极化电荷;沿 Z 轴方向加压应力 T3 不会产生任何方向的极化。因此,对于韧性剪切带内结晶学方位各异的各个石英晶体颗粒而言,剪切应力普遍会产生 X 轴方向和(或)Y 轴方向上的极化电荷。且由于 α -石英的压电模量较小,为 10^{-12}C/N 的数量级^[21],应力产生的应变只须有 10^{-8} 的量级,就会产生 10^4V/m 数量级的极化电场。剪切带内石英的普遍破裂现象表明,韧性剪切过程中石英的极化电场可能会超过 10^4V/m 数量级。也即可在石英颗粒 X 轴和(或)Y 轴方向的一侧表面及其附近形成局部强还原环境。

而韧性剪切作用过程是伴随有热液活动的,透射电镜研究已揭示石英中的位错环或位错线中可见到细小的汽液包裹体^[3],表明糜棱岩化过程中存在流体活动。热液中金络合物的分解反应则均为获取电子的还原过程,如:



这些还原分解反应在石英颗粒的负电荷极化一侧晶面或表面及其附近将极易进行,分解还原出的金则会就近附着在该面上。这应是金在微砂糖状石英中富集的主要原因。

此外,发生压电极化的相邻石英颗粒,若相距不远的两个面上集中了相反的电荷,则会导致电子发射,其间热液中的金络合物也会因此而分解。郭自强等的研究已证实岩石破裂时会出现电子发射现象^[22]。因此,韧性剪切过程中较大范围内的电子发射也会普遍使金络合物分解。

可见,韧性剪切带中普遍出现的石英晶体压电效应,应是金在微砂糖状石英中富集的主要原因,其具体机制则是由压电效应产生的局部负电荷集中区及电子发射导致了金络合物的分解和金的沉淀。由于石英压电效应始终与韧性剪切作用相伴随,因而由其导致的金的沉淀即金矿化是与韧性剪切作用相依相伴、同时进行的,这能很好地解释河台金矿区金矿只产于糜棱岩中,未见超出糜棱岩带之外且自然金沿剪切 Sc 面及 Ss 面分布的事实^[3],因为这些事实表明金矿富集于韧性剪切作用的同时。A. M. Boullier 等^[23]观察到含金微裂隙被随后的增量生长所截切,并据此认为金是在矿脉生长过程中就位的,属同生性质,这一结论与笔者的结论也一致。

而且,由于石英压电效应的作用强度是与剪切应力的的大小及其作用时间的长短成正比的,用石英压电效应导致金在微砂糖状石英中,也即在剪切带中富集的观点,也能很好地解释为什么剪切带内应变最强或应力最集中的部位恰是金品位最高的部位^[3,4],因为这些部位正是石英压电效应作用强度最大的地方,其所导致的金络合物的分解和金的沉淀数量也应最多。

4 结论

本文认为伴随韧性剪切作用全过程的石英压电效应是导致金在微砂糖状石英及剪切带内富集的主要原因。由剪切应力导生的石英压电效应,会造成石英颗粒的一侧表面及其附近出现

局部负电荷集中的强还原环境,及在相邻石英颗粒之间和剪切带内产生电子发射。它们均能有效地促使热液中金络合物的还原分解,释出的金将就近附着在石英粒间及颗粒表面上。这种机制对金的富集作用与韧性剪切作用是相依相伴,同时进行的,且在剪切带内应变最强或应力最集中的部位具有最大的作用强度。

毒砂、黄铁矿等硫化物矿物生长时其生长面附近出现的 Eh 和(或) S^{2-} 、 $[AsS]^{3-}$ 等组分浓度的局部降低是导致金络合物失稳、分解,进而引起金在这些矿物中富集的根本原因。也是金在富硫化物含金剪切带中富集的另一个重要因素。

韧性剪切作用导致的剪切带内石英细粒化、含金硫化物溶解及其所含金向细粒石英转移以及剪切带的体积亏损也有利于金在韧性剪切带中的富集。

由于石英产生压电效应的上限温度是 $573^{\circ}C$,故即使在地壳较深部位的韧性剪切带中,压电效应富集金的机制仍起作用。这可以作为韧性剪切带型金矿向深部找矿的理论依据。

参 考 文 献

- 1 刘继顺. 韧性剪切带中金成矿研究的若干问题. 地质论评, 1996, 42(2): 123~128.
- 2 邵世才. 试论韧性剪切作用与金的成矿. 贵金属地质, 1996, 5(2): 142~146.
- 3 王鹤年, 张景荣, 陆建军, 陈骏. 粤西金矿床地球化学. 南京大学出版社, 1992.
- 4 姜喜荣, 赵寅震, 肖劲民. 内蒙古莲花山金矿区成矿应力场数值模拟与隐伏矿床预测. 地质力学学报, 1995, 1(1): 82~87.
- 5 Bonnemaison M. Les "filons de quartz aurifere" au cas particulier de shear zone aurifere. Chron. Rech. Min., 1986, 482: 55~65.
- 6 刘劲鸿. 论太古宙含金剪切带的成矿机制. 长春地质学院学报, 1991, 21(2): 157~166.
- 7 杨元根, 王子江, 吴为民. 金动力迁移的构造地球化学实验研究. 矿产与地质, 1996, 10(1): 40~43.
- 8 钟增球. 剪切带的流体-岩石相互作用. 地学前缘, 1996, 3(3~4): 209~215.
- 9 Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 2nd edition. A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, 1979.
- 10 Boyle R W. The Geochemistry of Gold and its Deposits, Canada Geological Survey Bulletin, 1979. 1~280.
- 11 张文淮, 张志坚, 伍刚. 成矿流体及成矿机制. 地学前缘, 1996, 3(3~4): 245~252.
- 12 王玉明, 陈克荣. 次显微金在毒砂、黄铁矿等矿物中富集的成因研究. 矿物岩石, 1996, 16(3): 20~26.
- 13 Bonnemaison M, Marcoax M. Auriferous mineralization in some shear-zones: A three-stage model of metallogenesis. Mineral. Deposita, 1990, 25: 96~104.
- 14 Sibson R H, Robert F, Ponlsen K H. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. Geology, 1988, 16: 551~555.
- 15 沈保丰, 毛德宝, 李俊健. 绿岩带金矿床. 见: 张贻侠等主编. 中国金矿床: 进展与思考. 北京: 地质出版社, 1996. 78~85页.
- 16 王玉明, 季寿元, 陈克荣. 次显微金在黄铁矿和毒砂中的赋存状态新探讨. 矿物学报, 1994, 14(1): 83~87.
- 17 王玉明, 季寿元, 丘第荣. 含金硫化物矿物中不可能存在负价金. 地质论评, 1996, 42(2): 405~409.
- 18 王玉明, 陈小明. 石英中金的赋存状态研究. 地质地球化学, 1996, 5: 5~8.
- 19 韦永福, 袁有守, 余昌涛, 郑人来, 李文元. 中国东部金矿地质研究. 北京: 地质出版社, 1993.
- 20 韦必则. 剪切带研究的某些进展. 地质科技情报, 1996, 15(4): 97~101.
- 21 陈纲, 廖理儿. 晶体物理学基础. 北京: 科学出版社, 1992.
- 22 郭自强, 杨海涛, 刘斌. 花岗岩破裂发射的量子化学模型. 地球物理学报, 1990, 33(4): 23~28.
- 23 Boullier A M, Robert F. Palaeoseismic events recorded in Archaean gold-quartz vein networks, Val d'ore, Abitibi, Quebec, Canada. Journal of structural Geology, 1992, 14: 161~170.

作 者 简 介

王玉明,男,1962年5月生,江苏金坛人.1983、1986年分别于南京大学地球科学系获学士

及硕士学位(矿物学), 1986~1989 年为该校岩石学专业博士研究生。现任山西大学师范学院地理系教授、系主任, 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室客座研究员。从事于矿物物理、成矿机制及旅游地学的教学和科研工作。通讯地址: 030012, 山西省太原市山西大学师范学院地理系。电话: (0351)4032193 转 2286。

A New Mechanism of Gold Precipitation and Enrichment During Ductile Shear

Wang Yuming

(Department of Geography, Normal College of Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030012)

Abstract

It is generally considered that the mechanism of gold precipitation and enrichment in the process of ductile shear is coincident with the "three-stage ore-forming model" or "fault valve ore-forming model" or "hydrothermal solution mixing ore-forming model". Writers point out that the change of physicochemical macroconditions is not the main cause of instability or decomposition of Au-complexes nor the main cause of deposition of gold. For if it were so, gold would be scattered equally in different minerals which grow up at the same time. The fact is that gold is enriched mainly in sulfide minerals, such as pyrite and arsenopyrite and particulate microquartz.

The author believes that the decrease of Eh and/or S^{2-} and $[AsS]^{3-}$ within the microzone near the growing surface of pyrite or arsenopyrite cause instability or decomposition of Au-complexes. The gold coming from decomposition of Au-complexes will adhere to the growing surface of these sulfides nearby. At this moment, the physicochemical macroconditions of hydrothermal solutions probably have not reached the decompositional conditions of Au-complexes. They must only reach the growing conditions of these sulfide. The author emphasizes that it is an important cause of gold enrichment in a shear zone within abundant sulfides. Meanwhile, the author points out that quartz's piezoelectricity, which arises widely in the course of ductile shear, causes gold to be enriched in particulate microquartz. Quartz's piezoelectricity can yield a strong reducing microzone on one side of a quartz particle or nearby where the negative charge is much more concentrated. It can also induce electron emitting among quartz particles or within the whole shear zone. Both of them will cause Au-complexes to be decomposed forcefully in hydrothermal solutions. The gold coming from decomposition of Au-complexes will adhere to the surface of the quartz particle nearby or be deposited among quartz particles. This mechanism accompanies ductile shear all the time. So, it will act more forcefully in the zone where shear is stronger. According to the high temperature limit of quartz's piezoelectricity (573°C) the author infers that the piezoelectricity mechanism will still act in a ductile shear zone. It can be looked as the theoretical basis for looking for gold deposits hosted in shear zones in deeper levels of the earth's crust at depths.

Key words: shear zone; gold; ore-forming mechanism; crystal growth; piezoelectricity