

某些剪切带中的金矿化： 一个三阶段成矿模式

M. Bonnemaison E. Marcoux

该文对许多剪切带中含金石英脉型金矿床研究后，提出了这种类型矿床形成的三阶段成矿模式。剪切带中的金矿就是由这三个阶段连续演化的最终产物。这三阶段模式的划分是：早期阶段为含金硫化物的形成阶段，并可进一步分两幕。这个阶段的特点是有大量毒砂形成，金呈固溶体产出。中期阶段为金呈矿物产出阶段，也可分两幕，这阶段的特点是形成砂糖状石英，金呈矿物产出。晚期阶段（第五幕）的最大特点是形成块金。金矿的形成是变形作用和热液作用的综合作用结果。

剪切带在控制全世界各种金矿床特别是重要金矿床的定位中起着重要的作用。构造地质学作为金矿床研究的一种重要手段，使人们认识到，尽管金矿是赋存于次一级的脆性—韧性断层裂隙中，但最重要的金矿床常受主要剪切带控制的，而且第一级和第二级构造之间的流体压力和（或）温度状况对该流体迁移和金沉淀格局有重要作用。

这些矿床主要产于太古宙地盾中（加拿大的西格马矿山、拉马奎、魁北克阿比提比与卡迪拉克断层有关的许多矿山，红湖以及霍林格尔-麦克因特雷矿山。澳大利亚的金英里地区。印度的科拉尔金矿田。津巴布韦的金矿床）。类似的矿床还出现在近代地体中，例如法国的前海西和海西基底及新西兰的中生代片岩中。

本文介绍一个模式，以说明某些剪切带矿床中金矿化的发展，也可说明在这些矿床中常见到的变化。该模式使用“含金剪切带”的概念，其剪切带本身是矿化发展和富集作用的整体部分。含金剪切带在狭义上是从韧性到脆性变形演化的。该带大约几 km 长，10m 宽，垂直延深大（大于 1000m）。沿这些构造的岩石一般已糜棱岩化和叶理化，有些地方已角砾岩化。

为一些常见成因金矿床确定了成矿模式，该模式包括三个不同的发展阶段，每个阶段中金品位都有变化（主要是增加），但它们的形态特征和地质位置不同。

含金剪切带的三个演化阶段

贵金属地质矿产局（法国）进行的工作表明，剪切带中存在的工业金矿是由连续阶段组成的复杂演化的最终产物，结果使金进一步富集。我们的研究可识别出三个主要的演化阶段：早期阶段、中期阶段和晚期阶段。在第一和第二阶段中，我们分出一个开始幕和一个富集幕。

早期阶段：含金硫化物的形成

第一幕：金在构造中的固定作用 在剪切断层带内，应力和变形都集中在限制带内，带中的岩石都转变成片状岩石和糜棱岩，形成了狭义的剪切带。这些构造具有渗透

性,能使热流体在其中流动。这些流体在成因上似乎是不同的,但其成因仍知之甚少,它们可以是在区域变质作用过程中由岩石脱水形成,或是由侵入体定位伴生的热液活动所形成的,或是由地表流体(例如海水)在这些构造内活动而形成的。不同成因流体的混合是可能的,这可解释在含金剪切带的许多已知大型矿床中遇到的叠生组合。

变形作用和热液循环的综合作用,引起了岩石的矿物和地球化学成分的重要改变。伴有两种补充作用是:

1.母岩的部分溶解和化学成分的原地再分配。

2.在剪切作用的影响下,与母岩无关的外来成分的加入;它们向剪切带核心富集。

这种转变在镁铁质或超镁铁质岩石中特别明显。在富 CO_2 流体的作用下,特别是在所有含金剪切带都存在这种作用的情况下,蛇纹岩进一步碳酸盐化,直到这种岩石变为滑石菱镁片岩为止。这些作用包括淋滤作用和镁的完全迁出,铁由于硫化物和含铁碳酸盐的形成而部分地被固定下来。蛇纹岩的硅化与碳酸盐化是同时出现的。硅化在碳酸盐化蛇纹岩中不明显,主要发育于滑石菱镁片岩内,结果导致硅质岩的形成,通称“硅石墙”,如在新喀里多尼亚的纳基特和孔姆地区所见。含金剪切带一般都重叠了与硅化伴生的绿泥石化作用,在剪切带中心,硅化强度与变形的强度和重复性是一起增加的。

绿泥石化引起原始含钛矿物中 TiO_2 的析出,结果重新形成金红石,尽管不是所有钛都沉淀在原地的。钛在含金剪切带内是如此活动,看来它是剪切带演化早期热液强度的指示。

热液蚀变伴有浸染于糜棱岩片理面的含金磁黄铁矿的结晶作用,把这种构造作为一个整体来看,其金品位可达30ppm(原子吸收分析结果)。磁黄铁矿中的金不是以矿物形式存在,可设想它与铁相互置换的可能性,这与含金毒砂相似(见下面)。含金磁黄铁矿在糜棱岩相中是较少的,因此,这种构造没有金的经济富集。但可证明磁黄铁矿在金富集中起重要作用的结论是合理的,因为它含有原始金,后来又重富集于剪切带核部。

第二幕:金品位的提高 在剪切带的核部,热液蚀变是最强烈的。形成一条强硅化带,虽然该带局部含有1cm大小的大型金红石晶体,但从整体看该带是以明显缺钛而从构造带区别出来。核部还含有源自剪切带的一些元素富集,并引起磁黄铁矿转变为白铁矿—黄铁矿,使所含的金释放出来。

在含金剪切带有砷流入,毒砂(FeAsS)的富集是这种构造核部的标志。毒砂晶体一般是细粒(20—200 μm),并堆积在强硅化相带中。对勒萨特莱矿床由于磁黄铁矿被黄铁矿和白铁矿交代而形成的结构的详细研究表明,含金磁黄铁矿的不稳定作用与毒砂的沉淀是同时代的。在这种作用过程中被释放出的金呈固溶体状态被固定在含金毒砂晶体的外带。在勒萨特莱矿床,这些毒砂的特征是有明显的化学分带,金和砷的含量从晶体核部到边缘是增加(As从33.2增到38.0 at.%, Au从0增到1.6wt%),而锑和铁是减少的。Johan等(1989)指出Fe明显缺失,并为金加入毒砂晶格提出一种置换机制是 $2\text{As}[\text{Fe}] \rightleftharpoons (\text{Au}, \text{Sb}) + \text{Fe}$ (这里的 $\text{As}[\text{Fe}]$ 是指As进入铁的位置)。这种机制与Marion(1988)和Marion等(1986)使用Mössbauer光谱获得的结果很一致,这揭示出,含金毒砂中的金是呈一种非金属状态。这意味着存在 $\text{Au}(\text{III})$ 和/或 $\text{Sb}(\text{III})$ 。

在很少情况下,在有类似作用出现的地方,在早期就有锑的进入。在这种情况下,原始含金硫化物中金的新富集出现于辉铁锑矿内,它释放出所含的金,然后变成次生辉锑矿。

在滑石菱镁片岩中,在第二幕期间出现的主要金属(Cu-Zn-Sb-As)富集在该构造的核部。然而,这种岩石都保存有它们原生(Cr-Ni-Co)的地球化学特征,辉锑镍矿(NiSbS)和/或辉砷镍矿(NiAsS)在法国、中国和阿拉伯研究的所有滑石菱镁片岩中都有存在。针镍矿和硫锑镍矿在法国某些矿床中也是常见的。

在任何情况下,与第二幕有关的这种作用,使金富集品位增高。其对应矿床可划归为含金剪切带类型,是演化早期形成的矿床,也就是在含金构造中,金不是呈矿物出现的。在法国和圭亚那已识别出这种类型的一些构造,在那些地区内形成一些重要的金矿区。

中期阶段:金呈矿物出现

第三幕:容矿构造的形成 从剪切带演化早期开始,张裂隙既出现在剪切带内,也出现在剪切带边缘的围岩中。这种张裂隙有利于矿脉充填定位,例如乳白色石英透镜体,最厚10米或更大,长度很少大于200—300米。镁铁质岩墙(例如辉绿岩和闪长岩)或长英质岩(例如淡色花岗岩和微花岗岩)岩墙,一般以斑状为特征,也可能在剪切带中定位。这些岩石是作为容矿构造出现的,一般不含金矿化,但除一些小金粒可能产于石英中或重结晶硫化物之外。然而,这不能导致形成具有经济意义的金的富集。

第四幕:金的富集 由于沿剪切带的剪切作用重新发生或连续作用,已焊接早期张裂隙的容矿构造又发生变形。因为它们在机械性能上比围岩更坚硬,这些构造经受了强烈的碎裂作用,这种碎裂作用又为金沉淀准备了有利位置。就剪切带的厚度来说,它们是比较厚的(几十米),这种变形实际上影响了容矿构造的外带部分,这种岩性的不连续性指示出变形作用。乳白色石英构成的矿脉是由一种原始石英相经碎裂作用生成的,这种石英称为微砂糖状石英。Bonnemaison已证实这种石英对金矿化起贮藏器的作用。

容矿构造的矿化出现于演化早期阶段金富集之前的剪切带内。在一些地方,金的富集导致具有经济意义的高品位矿石的出现,经分析矿石品位为几十克/吨。含金矿化(Au、As、Sb)自剪切带被热液(常含Fe、Zn、Pb、Cu)带到容矿构造的狭小储金岩相中,它引起早期形成的含金硫化物(含金磁黄铁矿和/或毒砂)的破坏,并第一次形成自然金。

这种金是很纯的(Ag小于15wt%),并在硫化物或微砂糖状石英中形成1—100 μ m大小的小金球和包体。在砂糖状石英中,金微晶体群集成1毫米的小片,每个小片都集聚在硫化物晶体上。硫化物中的金并不显示择优组合关系,这在贝利埃尔的一些硫化物中可以见到。虽然这些硫化物含有许多自然金包体,但它们不是真正含金的,这种金是作为一种外来矿物加到硫化物上的,这种金矿化实质上是不同于演化早期阶段的含金硫化物矿化的,其中一种单矿物,一般是毒砂,是起着携带金的作用。

中期阶段矿化大量地消除了早期阶段的矿化,因此对它们的认识可能存在严重的困难。在法国利穆赞地区,中期阶段的含金构造中很少保存有早期的磁黄铁矿。白铁矿—黄铁矿薄片和线型构造的存在、较老磁黄铁矿的转变特征,是先前存在磁黄铁矿的典型

证据。在布尔纳克斯矿山，早期毒砂是非常少的。它仅被保存在糜棱岩相中，而决不是在开采的中期的石英透镜体内。

法国贵金属地质矿产局最近的工作表明，在大多数情况下，中期阶段的剪切带矿化是以具有明显的Au-Pb关系的特征，铅实际上形成方铅矿或硫酸盐，例如脆硫铅锑矿($Pb_4Sb_6FeS_{14}$) (表1)。因此，Pb常与这些矿床伴生。在利穆赞地区，中期阶段的含金构造常有与Cu、Zn、Bi、有时有Mo或Sn矿物的高温矿物共生，这可能表示是受深成作用影响的。

与中期阶段有关的液体包体在高压(0.5—2千巴)下的均一化温度为250℃到350℃。它们首先是一种均匀化液体，然后是一种不混合的液体体系，其特征是有时含大量 CH_4 和 N_2 的三相富 CO_2 包体，并有以水为主的低盐度包体。机械混合作用包括过量的深源 CO_2 喷射到先前富含 CO_2 的局部水溶液中，它可以解释不混合溶液的存在和沸腾现象，以及由于金二硫化物络合物的破坏而形成自然金的沉淀。溶液从剪切带某一部分迁移到另一部分，由于溶液—岩石的相互作用而伴有化学成分改变。

晚期阶段：块金的形成（第五幕）

在晚期张力构造体系中，张裂隙，例如张性裂隙和破裂发育于剪切带中，引起了矿物组合的进一步发育。这些组合可能不同，是与它们所处的张性环境类型相应的，但它们都含有块金，并且主要是产在石英晶洞中。

晚期张裂隙的逐步形成 当张裂隙进一步产生时，形成了许多小晶洞，在晶洞中，砂糖状石英重结晶成细粒的自形晶（直径0.1—1mm），这是在法国中央高原的含金构造中常见到的一种晶体。这些张裂隙与晚期矿化溶液的到达是同步的，该矿化溶液富含铅、铜和银，并导致复杂的共生矿物的结晶，包括第二世代的方铅矿，并含有深红银矿(Ag_3SbS_3)、银黝铜矿($[Ag, Cu]_{12}Sb_4S_{13}$)、银毛矿($Pb_3Ag_2Sb_6S_{18}$)、车轮矿($CuPbSbS_3$)、重晶石等。

金呈直径达几毫米的小块金产出，它含有高量银（银金矿的Ag为20—60wt.%），使它易于区别中期阶段生成的金。这些不同世代的金共同产在单一的矿化构造内。与第五幕有关的溶液是无挥发分的水溶液，具有一定盐度，具有比中期阶段低的均匀化温度（150℃—200℃）。

张裂隙导致网脉的定位 剪切带中的晚期张裂延伸长度是有限的，这已得到由乳白色石英细脉组成的网脉所证实。在火山岩、沉积岩或具斑状结构的深成岩中，对这些网脉的发育最有利。由乳白色石英组成的这些网脉常富含再活化转移的碳酸盐，而且在与滑石菱镁片岩共生的矿床中特别发育。在位于这些构造的核部范围内，它们形成了10米至几百米大小的透镜体骨架。

在剪切带中的大型晚期张裂隙 剪切带中后期孔洞集中于一单一不整合中，这些孔洞可能是较大的，导致一种新的厚1米至几米的石英脉形成。由于缺乏后期角砾岩化，这种石英显示出一种典型的“肾形”形态，并具有1厘米大小的自形晶体，局部有10厘米的自形晶体。这种现象是由于新的容矿构造形成所致，并在整个剪切带的金富集中引起物质亏损，在新石英脉脉壁有局部块金形成。

讨论和结论

岩性环境的变化是受到早期剪切带以及在中期阶段最终形成的各种容矿构造特征影响之故,这对在这种矿床中发育的矿化类型有很大差异是有重要影响的。在早期阶段,矿化特征实际是容矿岩在变形和热液蚀变的综合作用经受双重作用改造的结果。剪切带核部矿化的总体成分是直接从容矿岩化学成分继承来的,但除微量元素特别是铅和金之外,因最主要的溶液流入限定了硫(硫化),钾(钾蚀变)和二氧化碳(碳酸盐化)。镁铁质和超镁铁质岩石是有能力形成滑石菱镁片岩型的矿石。图1说明在不同成分岩体的早期含金剪切带中影响矿石类型的差异性。

容矿岩在不同应力梯度下的机械行为,是控制演化中期和晚期阶段产生的张裂隙型式的最基本作用。它可形成网脉型或脉型矿石,矿石成分也反映出容矿岩的化学组成和性质。

含金剪切带中矿化的多样性被后来的变形作用和溶液循环的叠加进一步复杂化,并引起先存矿化的重结晶作用、早期阶段含金硫化物的破坏及金在中期阶段第一次呈矿物出现后的块金化作用。

剪切带中具经济意义的金富集形成,是需要有与各种应力态和应变态有关的不同演化期的叠加。因此,这些矿化构造是以具长期作用为特征,在某种情况下,这种作用延续时间超过几千万年,在这期间,金的富集程度进一步增加。

金在剪切带的最早期阶段就出现,呈含金磁黄铁矿形式出现,与此同时,岩石经过了变形,我们没有关于这种磁黄铁矿沉积后在构造中有新的金供给的证据。仅这种情况,金呈矿物出现也将经过变化。后来每幕的压碎作用都伴有早期剪切带中的热液循环,这是导致金在某些有利位置和构造而富集的因素。相反,随着脉和网脉的产生,后来每期的张裂隙是导致矿化重新分布的因素,在某种情况还使矿化淡化。然而,各期张裂隙在金呈矿物出现和以后的块金化作用中起重要作用。

从整体来说这些不同矿化幕的连续性决定了金富集的累积趋向。老构造是以经过几次构造期为特征,常比年轻构造有较好的金潜力。

图2总结了酸性或火山沉积环境中含金剪切带不同演化幕的特征以及金品位变化。

在早期阶段(第一幕),在容矿岩所包括的由含金磁黄铁矿和金属硫化物组成的浸染状金矿化,发育于剪切带的糜棱岩片理面上。这种矿化没有经济意义(含金一般低于1克/吨),在某些情况下还含砷。在构造核部,初步有经济意义富集的含金硫化物矿化

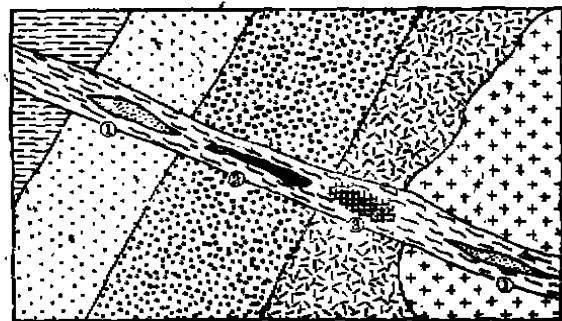


图1 早期阶段含金剪切带(第二幕)
核部发育的矿石相变化

1—含浸染状含金硫化物的硅化带; 2—硫化物浸染体,局部为块状; 3—硅化滑石菱镁片岩

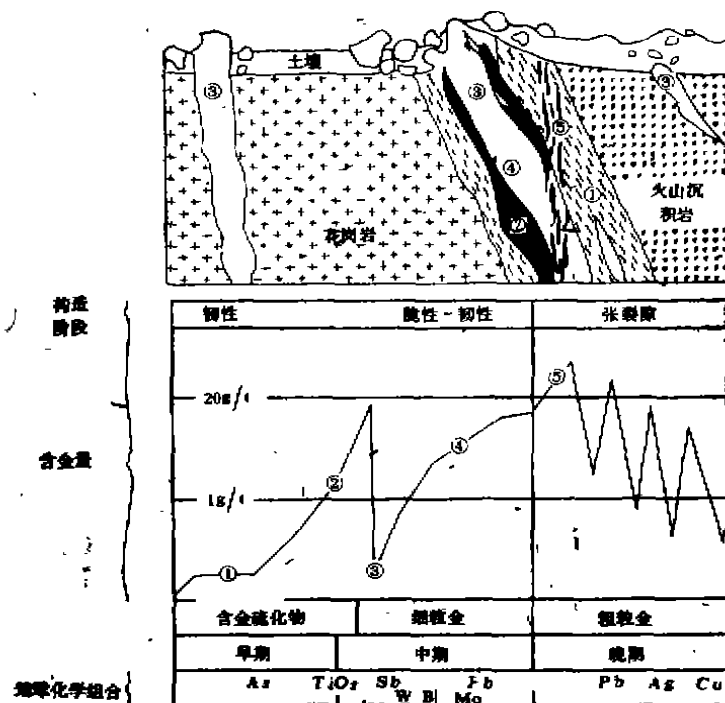


图2 产在酸性或火山沉积环境中剪切带的含金石英脉的演化图解

金含量指的是每演化幕矿石分析数据。1—5是表示剪切带演化幕顺序。早期阶段：1和2幕；1幕—浸染状含金磁黄铁矿发育；2幕—浸染状含金毒砂出现，使金富集程度增高。中期阶段：3和4幕；3幕—容矿构造的定位；4幕—容矿构造的形成，自然金沉淀。晚期阶段：5幕—网脉的形成和金的块金作用

产在缺钛的硅化带中（第二幕）。金不呈矿物出现，并富集在毒砂晶体周围。

由乳白色石英组成的无矿石英脉（第三幕）定位于早期剪切带内或其附近。这些石英脉显示出Bi、W、Mo或Sn共生组合。由于构造再活化作用产生的碎裂作用，使石英脉转变为部分和全部金新矿化的贮藏器，这些金是从早期矿化的再活化转移而继承下来的。这种现象是与中期阶段（第四幕）的富集期是相应的，一般以有铅供应为标志，并形成方铅矿，在土壤层有铅的地球化学异常。

在晚期阶段（第五幕），石英网脉发育于剪切带中。由于再活化矿石性质不同，有不同的富块金矿化的形成（图2的1、2或4类），（2+5）或（4+5）组合产生高品位矿石，而（1+5）或（3+5）组合产生低级矿石。在这种规模的构造中，这种现象常与银、铅和铜伴生，常常由于金含量的减少而造成矿石贫化，尽管存在含有发育很好的银金块金的特殊矿石，这是形成非常高的但很局部的金品位（可达几百克/吨）。在图2中用锯齿型式表示晚期样品金含量的明显变化。

摘译自 Mineralum Deposita, 1990, Vol.25(2),
pp.96~104

李上森 译