与剪切带相关的金成矿作用

王义天[1], 毛景文[1,2], 李晓峰[1], 杨富全[1,2]

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所,北京 100037; 2. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘 要:与剪切带相关的金矿床在全球范围内普遍发育,并往往形成大型、超大型金矿床。剪切带如同一个黄金的"天然生产车间",其应变特征和构造演化控制着金的成矿作用。成矿元素主要来源于深部和围岩,成矿流体具有多源性,主要为 C-O-H 体系。剪切带内温度和压力的变化直接影响着成矿流体的运移和成矿元素的沉淀。"断层阀"模式和三阶段模式是目前理解该类金矿床成矿机制的重要认识。在剪切带长期的构造演化过程中,构造叠加和区域构造体制转换导致成矿作用的多期性和复杂性,使成矿作用规模不断提高,从而形成大型剪切金矿带或金矿集中区。

关键词:剪切带;构造叠加;成矿元素;成矿流体;金成矿作用;成矿机制

中图分类号:P618.51 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2321(2004)02-0393-08

在全球范围内,与剪切带相关的金矿床普遍发育。自 20 世纪 80 年代以来,国内外的研究者们对该类金矿床开展了大量卓有成效的研究工作,在理论方面不断取得新认识和新进展,使人们对与剪切带相关的金成矿作用的理解逐渐深入和全面。同时,在找矿实践中,剪切带已被作为一种重要的勘查线索和目标,引导地质工作者们在金矿勘探方面取得许多新突破,在剪切带中发现了许多大型、超大型金矿床。剪切带在地球岩石圈中就如同一个"天然生产车间",金等成矿物质通过"加工",即经历长期复杂的成矿作用过程后,形成最终"产品"——金矿。

1 剪切带的分类概述

剪切带是发育在地壳内部的一种狭长的板状、席状、面状、或曲面状的由高应变岩石组成的构造带[1,2],即一条线性高应变带。依照不同的分类标准,剪切带可有以下几种不同的类型划分。根据其岩石变形特征,一般分为脆性、韧性剪切带两个端员类型和它们之间的过渡类型脆-韧性剪切带。另外,国外学者还分出一种半脆性(semi-brittle)剪切带[2],指那些以脆性变形为主,同时发育由压溶或碎裂流动机制产生的雁列脉和雁列缝合线等构造的剪切带,但这一提法在国内不常用。Sibson[3]提出的断层双层结构模型表明,一条理想的大型剪切带在垂向上由地表向深部的不同构造层次上表现出连续的脆性、脆-韧性和韧性的变形特征,相应的岩石变形产物为碎裂岩系列和糜棱岩系列。根据剪切带的运动学特征,可以分为逆冲、正滑和走滑剪切带,前二者统称为倾滑(dip-slip)剪切带。在自然界中更常见的是倾滑与走滑之间的过渡类型,即斜滑(oblique-slip)剪切带,此外还存在旋转滑动(rotational slip)剪切带。结合区域构造体制和剪切运动特征,对于大型剪切带一般可分为挤压推覆剪切带、伸展滑脱剪切带和平移走滑剪切带,此外还有剪切面近水平的圈层滑移剪切带。在大型剪切带的形成发育过程中常常派生出一些次级构造共同组成剪切构造系统,因此根据其主次关系和规模可分为主剪切带、次级剪切带,或称一级剪切带、二级剪切带等。

2 金成矿作用特征

与剪切带相关的金成矿作用所形成的金矿床在国内一般被称为韧性剪切带型金矿、剪切带型金矿、脆-韧性剪切带型金矿或含金剪切带型金矿等。而在国外英文文献中,常用的术语一般是与剪切带相关的(related to shear zone)、剪切带容矿的(shear zone-

收稿日期:2003-03-04;**修订日期**:2004-03-20

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2001CB409807, G1999043211)

作者简介:王义天(1969—),男,副研究员,构造地质学与矿床学专业。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

hosted)或产于剪切带内的(located in shear zone)金矿等。对此刘继顺[4]分析后认为使用"与韧性剪切带有关的金矿床"比较合适,但事实上,许多产于韧性剪切带中的金矿其成矿作用不仅与韧性剪切有关,更与其后的脆-韧性剪切或脆性剪切有关(详后)。因此,翟裕生等[5]提出在探讨大型剪切带对金成矿作用的控制作用时,既要注意韧性剪切作用,更要注意脆-韧性及脆性剪切作用的演变和叠加对成矿的意义。所以在本文中所采用的术语是与剪切带相关的金矿床或剪切带容矿的金矿床。

2.1 矿化类型

与剪切带相关的金矿床的矿化类型主要有蚀变糜棱岩型、破碎蚀变岩型和石英脉型,矿化主要表现为细脉浸染状、网脉状和脉状等。金矿化类型的发育受剪切变形作用的控制[5~7],一般地,在韧性变形域中发育细脉浸染状蚀变糜棱岩型和蚀变千糜岩型矿化,在脆-韧性变形域中发育网脉状蚀变糜棱岩型和破碎蚀变岩型矿化,在脆性变形域中发育石英脉型矿化。采用有限单元法对胶东望儿山金矿成矿期的应力场状态模拟表明,构造应力场不仅控制了矿体的形成,而且也控制了矿化类型[8]。高应变能高变化梯度的扩容区有利于石英脉型矿体的形成,而高应变能低变化梯度的扩容区有利于蚀变岩型矿体的形成。

整体上,在一个理想的连续演化的剪切带剖面上自下而上一般依次出现蚀变糜棱岩、破碎蚀变岩和石英脉等矿化类型,即不同的矿化类型与不同的构造层次、不同的构造岩类型和不同的构造变形强度等相对应,是剪切构造活动对金成矿作用控制的直接表现。实际上,随着地壳隆升剥蚀和大型剪切带的持续多阶段演化,后期多期性的脆-韧性或脆性构造变形叠加,可导致多种矿化类型在同一构造部位同时出现[6]。

2.2 成矿作用的空间分布

由于金矿体严格产于剪切构造带内,所以与剪切带相关的金矿床也常被称为剪切带容矿的金矿床。在不同的空间尺度上,金成矿作用的分布表现出具有普遍意义的规律性。如前所述,在区域大尺度上根据剪切带规模可分为一级和二级构造(或称主剪切带和次级剪切带)。一级构造一般是长度大于 100 km 的切穿地壳的区域性大型构造带,由其派生的二级构造一般为长度 1~10 km 的壳内构造带。一级构造控制着金矿带或金矿集中区的分布,而金矿床则具体产于二级构造带中[9]。在矿区中、小尺度上,金矿体一般呈脉状、条带状、似层状或透镜状发育在次级剪切带中的强变形域内,矿石则分布于变形带中发育的次级面理和裂隙组合系统(即里德尔单剪模式)中。

剪切带在不同空间尺度上对金成矿作用的控制,表明了剪切成矿系统具有系统的自相似性。即矿床-矿体-矿石等不同尺度上的成矿作用产物具有相似的分布产出特征,其容矿部位一般遵循里德尔单剪模式[5,10~14]。

2.3 成矿作用的时代

人们普遍注意到金成矿作用一般总是滞后于剪切作用过程,即成矿与剪切之间存在时差[15,16],邵世才因此认为剪切作用本身成矿的可能性较小,剪切只是创造了成矿空间[15]。陈柏林等[16]针对此问题讨论后认为这种时差的存在是由于 Au 元素活化分异区与聚集成矿区位于剪切带剖面的不同层次上,目前所见的赋存矿体的韧性剪切带是被抬升了的稍早的深层次韧性剪切带,其中的金矿化稍晚一些,使含金热液形成的韧性剪切带的韧性-超韧性深层次变形域仍处在地下尚未出露地表。刘连登等则将产于前寒武纪绿岩中的辽宁南龙王庙金矿称为"同韧性剪切带"金矿床,即矿床产于韧性剪切带中,在形成时间上与韧性剪切带是连续的,剪切带形成在先,金矿形成在后,但两者之间无地质间断[17]。

以上的研究更多的是关注成矿作用与韧性剪切过程之间的时间关系,而忽略了与脆-韧性变形之间的关系。概括起来,剪切带与金成矿作用之间的时间关系大致有两种情况。一种情况是在同期剪切构造变形过程中,剪切带在不同构造层次上同时表现出不同的变形特征,成矿元素从深部韧性(超韧性)剪切变形域中活化迁出,沿剪切带向上迁移到中、浅层次的脆-韧性、脆性变形域中沉淀富集[6],构造-热事件与成矿事件属于同一演化过程的产物,只是矿质的沉淀时间要略晚于深层次的韧性变形,而与赋矿部位的脆-韧性变形几乎是同步的。另外一种情况发生在不同的构造变形过程中,即早期韧性剪切带经抬升剥蚀后构造层次上移,叠加了后期的脆-韧性、脆性变形,成矿作用也随之发生叠加,从而在同一构造部位出现多种矿化类型组合。这种成矿作用的多期性往往能够形成富矿和大矿,其成矿一般主要发生在后期的叠加阶段,因而主期成矿年龄与早期韧性剪切带的糜棱岩形成时代往往相差较大,但

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

与成矿期的剪切变形仍然是连续的。

3 金成矿作用机制

3.1 成矿物质的来源和演化

大量的研究表明,与剪切带相关的金矿床的成矿物质(包括成矿元素和成矿流体)主要来源于深部和容矿围岩,其演化过程受到剪切构造作用的制约。

3.1.1 成矿元素

与剪切带相关的金矿床一般对围岩没有选择性,几乎可以产在所有的岩石中。容矿岩石普遍经受浅—中等变质作用,主要为绿片岩相,少数可达角闪岩相和麻粒岩相。但是,在不同岩性中金矿床的产出机率非常不同[18]。在全球范围内尤其是国外,前寒武纪是与剪切带相关的金矿床最发育的时期。其中,太古宙的金矿床主要赋存于绿岩带中的拉斑玄武岩内,例如加拿大的阿比提比(Abitibi)绿岩带[19,20]、西澳大利亚耶尔岗(Yilgarn)地盾[19,21]、我国华北地台周边[5,11,17,22~27]等与剪切带相关的金矿床的成矿元素主要来自太古宙变质岩系。元古宙金矿床则与陆内非造山期岩浆作用关系密切,产于陆内盆地环境[28]。进入显生宙后,与剪切带相关的金矿床主要赋存于浅变质的浊积岩中[19,29]。在深层次的韧性-超韧性变形过程中,剪切变形的机械能转化为反应体系的自由能,通过压溶作用使金等成矿元素从围岩中活化出来。

成矿元素的另外来源是深部的下地壳或上地幔。张秋生等[30]提出地下800~4 500 km深处存在"液态矿源层"的假设,当大型韧性剪切带穿透液态矿源层时,含矿流体便上升到地壳浅部成矿。Groves[21]提出金成矿作用的"地壳连续统一体"模式(crustal continuum model),认为新太古代时存在巨大的深部来源的含矿流体。牛树银[31]等提出在华北盆岭省存在地幔亚热柱构造,当核幔边界涌动或受干扰形成上升地幔热柱时,金、银等成矿物质可随其向上迁移,到达岩石圈后可进入切穿地壳的韧性剪切带中演化成矿。

含金低温脆-韧性剪切变质带在空间分布上常与中—酸性花岗质岩体伴生。岩体一般以弱碱性的似斑状钾长花岗岩为主,与剪切带呈侵入接触关系,局部发育热接触变质带,岩体边缘发育弱片麻理,产状与剪切带中的叶理基本一致,表明岩体为同构造的产物,但形成于韧性剪切变质作用的晚期阶段。根据以上特征,翟裕生等[5]认为在胶东金矿区,主要于中生代形成的受脆-韧性剪切带控制的同源交代重熔花岗岩可能是金矿床的直接矿源层。

3.1.2 成矿流体

对太古宙剪切带容矿的金矿床成矿流体的地球化学特征研究表明,其成矿流体可能有4种来源:变质的、岩浆的、地幔排气和下地壳麻粒岩化的,以及深循环的地下水[32]。同时,多源流体的混合也可能存在。在塑性环境下发育的韧性剪切带中多以变质流体和岩浆流体为主,在脆性环境下发育的剪切带则要更多的考虑大气降水的下渗[33]。与金矿有关的剪切带中流体主要为C-O-H体系,流体在韧性变形过程中与麋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。这些SiO_2在流体中主要以胶体态存在,并使Au在热液中的溶解度升高,有利于流体从围岩中汲取大量成矿元素[34]。在韧性剪切带中由于流体的渗透而产生物质成分变化,如Si,K,Na,Ca,Rb,Sr,U,Th等元素一般表现为迁移亏损,Al,P,Mg,Ti,Cr,V,Zr,Y等元素一般表现为不活动富集[35,36,37]。

剪切带中的大量流体是成矿作用的介质,可吸取和搬运成矿元素[38],其活动同时影响着构造带的变形机制。与剪切带动力过程密切相关的成矿流体的物理化学参数是温度、压力和相态。流体相分离是剪切带成矿流体的普遍特征,它反映了剪切带对金成矿作用的控制[32]。金的溶解度试验研究表明,在成矿流体中金主要以络合物$AuHS(H_2S)^0_3$的形式迁移,$AuHS(H_2S)^0_3$的溶解度对温度和压力的变化极其敏感,例如当温度从400 ℃降到340 ℃时,或者压力降低200 MPa左右时,溶液中90 %的金将沉淀出来[39]。这一试验结果很好地解释了深部成矿流体沿剪切带向上迁移的过程中,往往在韧-脆性转换带中卸载沉淀、富集成矿。因为这一区域的温度往往由400 ℃降到300 ℃,压力也同时降低,这种温压条件与绿片岩的变质环境相一致[40,41]。全球已开采的95 %脉状金矿都是产于这种温压环境,只有5 %是产于温度或高或低的金矿床中[41]。

在剪切带的韧性变形域中,成矿流体的运移主要以渗透交代方式为主,形成蚀变糜棱岩型矿体;在脆性变形域中主要为充填方式,形成石英脉型矿体;在脆-韧性变形域中流体活动则兼具以上两种方式的特点,形成网脉状石英脉型或破碎蚀变岩型矿体。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对剪切构造成矿系统的质量平衡分析表明,剪切带中存在较大的流体与岩石比值,金矿体定位于流体流量最大部位,即剪切带的扩容带中[42]。

3.2 成矿动力学模式

金的成矿作用过程直接受到剪切带的构造控制,因此人们在研究其形成机制时自然而然的从构造演化和动力学的角度入手,来分析和认识与剪切带相关的金成矿作用的成因模式。

"断层阀"模式或"断层阀-地震泵吸-周期性破裂愈合"模式[40,43~46]是一个目前被研究者所普遍接受的成矿动力学模式,它综合分析了剪切带的构造运动学和动力学特征,以及相关的成矿作用特征,合理地解释了剪切带的构造活动机制及其对成矿流体的运移、聚集和成矿的控制过程。该模式的前提是"断层双层结构"模型,即大型剪切带在深部表现为韧性变形,构造运动方式是连续的、非地震性的;在浅部则为脆性变形,其运动方式为非连续的地震性滑动。地震成核作用发生在脆性层的底部,即韧-脆性转换带,它控制了浅部的地震滑动。该模式的基本内容如下:(1)破裂前:断层处于愈合状态,对于从剪切带深部向上运移来的成矿流体而言,浅部地壳起着盖层作用。由于剪切带向上逐渐变窄,流体压力(p_f)将随着流体的持续涌入和聚积而逐渐增高,当 $p_f = \sigma_n + R_t$ 时(σ_n 为载荷压力或正应力,R_t 为岩石抗张强度),引起岩石破裂,产生水平裂隙。(2)地震破裂(断层阀):当 $p_f > \sigma_n + R_t$ 时,累积的剪应力将导致陡直剪切破裂的产生。破裂过程首先是在地震带的底部(韧-脆性转换带)发生地震成核作用,然后是形成直达地表的地震破裂,同时产生大量的渗透性裂隙。破裂过程使累积的剪应力得以释放。(3)流体充填(地震泵吸):破裂的发生使流体压力降低,在剪裂隙及其次生裂隙系统中将发生成矿流体充填作用,流体中的成矿物质则产生沉淀作用,如形成含金石英脉。(4)自愈合:流体充填和矿物的沉淀作用使剪裂隙逐渐愈合,导致渗透率逐渐降低。(5)再循环:破裂愈合之后,流体压力和剪应力将再次发生积聚,重新开始上述过程而进入下一个循环。成矿流体如此反复多次的运移聚集,在剪切带中将导致广泛的蚀变与矿化,从而形成金矿床。

根据含金剪切带的构造演化过程和成矿作用特征,Bonnemaison 等[47]提出金成矿作用的三阶段模式:(1)早期阶段:韧性剪切带的形成使岩石发生糜棱岩化和强烈片理化,从而为热液活动提供了通道,使剪切带内的岩石遭受强烈蚀变,并在剪切带中心部位形成强硅化蚀变岩带。该阶段最初形成含金磁黄铁矿,接着被含金黄铁矿-白铁矿和毒砂所代替,金为分布于硫化物晶格内的不可见金,是金的初步富集阶段。(2)中期阶段:在脆-韧性变形过程中,剪切作用形成脆性裂隙及各种充填脉,如透镜状、脉状石英。剪切作用的持续进行使矿物遭受压碎作用,石英细粒化成糖粒状,成为金矿物的有利储集体。该阶段的热液作用导致早期的含金硫化物分解,不可见金在有利部位富集为可见金。(3)晚期阶段:在脆性变形机制下,大量张性裂隙在剪切带中形成。前期形成的金矿化发生原位重新活化,矿物组合更复杂,形成粒度较粗的金。金矿化在剪切带的构造演化中经历了不可见金—微细粒金—粗粒金的富集过程,金含量不断升高。

4 大型剪切成矿带

大型剪切带是地壳中的高度活动带、能量汇聚带、高渗透区和流体汇集区[48],与剪切带相关的金矿床经常成带成群分布、集中出现,在空间上构成金矿化集中区,从而形成大型、超大型金矿床[5,49]。例如,加拿大的阿比提比金矿带、西澳的卡尔古里—康巴尔达金矿带以及我国华北地台周缘的胶东金矿带和小秦岭金矿带等。在这些金成矿带中,挤压推覆剪切带、伸展滑脱剪切带和平移走滑剪切带都有出现,尤其是当区域构造体制发生转换。例如使挤压型剪切带转变为伸展型或走滑型剪切带时,金的成矿作用规模将大大提高。一般地,以挤压推覆或伸展滑脱为主的大型剪切带往往与次级剪切带一起组成大型矿集区,如胶东和小秦岭地区等。而以走滑为主的剪切带则往往形成在走向上延伸可达上百 km 的大型成矿带,如控制广东河台金矿的吴川—四会剪切带[50]、东天山康古尔塔格金矿带等[51~54]。康古尔塔格金矿带沿其走向在 200 余 km 的长度范围内产出大小金矿床(点)20 多个,主要成矿作用发生在晚石炭世—早二叠世,由早期碰撞挤压转换为后碰撞阶段的右行走滑剪切的雅满苏—苦水大型剪切带控制着该金矿带的发育。因为沿走滑剪切带的走向应力应变分布的局域性,所以在不同部位可同时出现压剪变形区或张剪变形区,并形成多种类型的相关构造[55]。在雅满苏—苦水大型剪切带中,由于剪切断裂面的弯曲导致构造应力应变分布的不同

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

以及围岩岩性的不同,因而在其走向上的不同部位发育不同的金成矿类型,即在压剪构造区发育蚀变糜棱岩型和石英脉型金矿(如康古尔、马头滩、红石等),在张剪构造区发育浅成低温热液型金矿(如石英滩)、与浅成小岩体有关的脉状金矿(如西凤山)等,所有金矿都是由区域大型剪切带控制的同期成矿事件的产物[54]。

5 结语

在我国,与剪切带相关的金矿床除了在华北地台周缘的前寒武纪变质岩系中大量发育,在其它很多地区也普遍发育[56~66]。主要的大型、超大型金矿床都与剪切带有关,使该类金矿床成为国内首位黄金开采类型。在未知地区的勘探实践中,剪切带已成为一个重要的找矿线索。在已知的金矿区或金矿带中,到深部和沿剪切带走向及其次级剪切构造系统中继续寻找新的金矿体或矿床,是扩大资源储量的一个重要方向和途径。对与剪切带相关的金成矿作用继续进行深入的理论研究和探索,将对全面认识和合理开发该类型金矿床以及相关的构造物质演化和大陆动力学都具有重要的意义。

References[参考文献]:

[1] RAMSAY J G. Shear zone geometry: A review[J]. *J Struct Geol*, 1980, 2: 83-99.

[2] DAVIS G H, REYNOLDS S J. *Structural Geology of Rocks and Regions*[M]. New York: John Wiley & Sons, INC, 1996. 1-776.

[3] SIBSON R H. Fault rocks and fault mechanism[J]. *Geol Soc London*, 1977, 133: 191-213.

[4] LIU J S. Some problems in the study of gold mineralization in ductile shear zone[J]. *Geological Review*, 1996, 42: 123-128 (in Chinese). [刘继顺. 韧性剪切带中金成矿研究的若干问题[J]. 地质论评,1996, 42: 123-128.]

[5] ZHAI Y S, ZHANG H, SONG H L, et al. *Macroscopic Structures and Superlarge Ore Deposits*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997. 1-180 (in Chinese). [翟裕生,张湖,宋鸿林,等. 大型构造与超大型矿床[M\]. 北京:地质出版社,1997. 1-180.]

[6] CHEN B L, DONG F X, LI Z J. Ore-forming model of ductile shear zone type gold deposit[J]. *Geological Review*, 1999, 45: 186-192 (in Chinese). [陈柏林,董法先,李中坚. 韧性剪切带型金矿成矿模式[J]. 地质论评,1999, 45: 186-192.]

[7] CHEN B L. Comparison of geological and geochemical characteristics between gold deposits of different types related with ductile shear zones[J]. *Geology Geochemistry*, 2000, 28: 24-30 (in Chinese). [陈柏林. 与韧性剪切带有关的不同金矿化类型地质地球化学特征对比研究[J]. 地质地球化学,2000, 28: 24-30.]

[8] FANG J Y, YAO S Z, ZHOU Z G, et al. Mathematical model and numerical simulation of shear-zone metallogenesis in Wangershan gold deposit[J]. *Earth Science —J China University of Geosciences*, 1999, 24: 83-87 (in Chinese). [方金云,姚书振,周宗桂,等. 望儿山金矿床剪切带控矿作用的数学模型与模拟[J]. 地球科学——中国地质大学学报,1999, 24: 83-87.]

[9] EISENLOHR B N, GROVES D I, PARTINGTON G A. Crustal scale shear zone and their significance to Archean gold mineralization in western Australia[J]. *Mineralium Deposita*, 1989, 24: 1-8.

[10] ROBERTS R G. Ore deposit model # 11: Archean lode gold deposits[J]. *Geoscience Canada*, 1987, 14: 37-52.

[11] HU Z G, QIAN Z Z, YAN G M, et al. *Xiaoqinling Metamorphic Core Complex and Gold Deposits*[M]. Xi'an: Shanxi Press of Science and Technology, 1994. 1-238 (in Chinese). [胡正国,钱壮志,闫广民,等. 小秦岭拆离-变质杂岩核构造与金矿[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1994. 1-238.]

[12] WANG K Y, CAO X Z, LU Z X. Two mineralization types and thermoluminescent evolution marks of quartz in Jinshan gold deposit, Xiangxi[J]. *Gold Geology*, 1999, 5: 49-54 (in Chinese). [王可勇,曹新志,卢作祥. 江西金山金矿床两类矿化及其石英热发光特征[J]. 黄金地质,1999, 5: 49-54.]

[13] WANG Yitian, HU Zhengguo. Relationship between gold mineralization and strike-slip faulting in Wulonggou mining district, eastern Kunlun Mountains[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2000, 9: 19-28.

[14] CHEN B L, YANG N, WU G G, et al. Analysis of ore-controlling structure in ductile shear zone type gold deposits in southern Beishan area, Gansu Province[J]. *Mineral Deposit*, 2002, 21: 149-158 (in Chinese). [陈柏林,杨农,吴淦国,等. 甘肃北山南带韧性剪切带型金矿床构造控矿解析[J]. 矿床地质,2002, 21: 149-158.]

[15] SHAO S C. Discussion on the relationship between ductile shearing and mineralization of gold[J]. *J Precious Metallic Geology*, 1996, 5: 142-146 (in Chinese). [邵世才. 试论韧性剪切作用与金的成矿[J]. 贵金属地质, 1996, 5: 142-146.]

[16] CHEN B L, LI Z J, DONG F X. Discussion on the importance of ductile shear deformation in gold mineralizing process[J]. *J Precious Metallic Geology*, 1998, 7: 228-232 (in Chinese). [陈柏林,李中坚,董法先. 亦论韧性剪切变形与金的成矿作用——与邵世才《试论韧性剪切变形与金的成矿》一文的讨论[J]. 贵金属地质,1998, 7: 228-232.]

[17] LIU L D, ZHU Y Z, DAI S B, et al. Gold deposit, ductile shear zone and superimposed tectonics[A]. ZHANG Y X, LIU L D. *Precambrian Ore Deposits and Tectonics in China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. 39-77 (in Chinese). [刘连登,朱永正,戴仕炳,等. 金矿与韧性剪切带及其叠加构造[A]. 张贻侠,刘连登. 中国前寒武纪矿床与构造[M]. 1994. 39-77.]

[18] LIU Y L. Foreign research progress in ductile shear zone gold deposit[J]. *Gold Geology*, 1996, 2: 76-80 (in Chinese). [刘玉琳. 国

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

外韧性剪切带型金矿研究现状[J].黄金地质,1996,2:76-80.]

[19] GOLDFARB R J, GROVES D I, GARDOLL S. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis [J]. *Ore Geology Review*, 2001, 18: 1-75.

[20] LECLAIR A D. Crustal-scale auriferous shear zones in the central Superior province, Canada[J]. *Geology*, 1993, 21: 399-402.

[21] GROVES D I. The crustal continuum model for late-Archaean lode-gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia[J]. *Mineralium Deposita*, 1993, 28: 366-374.

[22] LU H Z, GUHA J, FANG G B. Characteristics of ore forming fluid in Linglong Gold Mine, Shandong, China [J]. *Geochimica*, 1999, 28: 421-437 (in Chinese). [卢焕章,GUHA J,方根保.山东玲珑金矿的成矿流体特征[J].地球化学,1999,28:421-437.]

[23] DENG J, ZHAI Y S, YANG L Q, et al. Tectonic evolution and dynamics of metallogenic system —An example from the gold ore deposits concentrated area in Jiaodong, Shandong, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6: 315-323 (in Chinese). [邓军,翟裕生,杨立强,等.构造演化与成矿系统动力学——以胶东金矿集中区为例[J].地学前缘,1999,6:315-323.]

[24] WANG Y W, ZHU F S, GONG R T. Tectonic isotope geochemistry —Further study on sulphur isotope of Jiaodong gold concentration area[J]. *Gold*, 2002, 23: 1-16 (in Chinese). [王义文,朱奉三,宫润谭.构造同位素地球化学——胶东金矿集中区硫同位素再研究[J].黄金,2002,23:1-16.]

[25] LU Y F, QIN S X. Tectonic evolution and structural ore-controlling in south Liaoning Province[J]. *Liaoning Geology*, 1998, 3: 161-168 (in Chinese). [吕贻峰,秦松贤.辽南地区构造演化与构造控矿[J].辽宁地质,1998,3:161-168.]

[26] LIU Z H, WANG A J, XU H. Genetic model of ductile-shear type gold deposits in Wutai Mountain area[J]. *Mineral Deposits*, 1997, 16: 350-364 (in Chinese). [刘志宏,王安建,许虹.五台山地区韧性剪切带型金矿成因[J].矿床地质,1997,16:350-364.]

[27] ZHANG P C, LIU R Q, GUO W C. Characteristics of Au mineralization in Precambrian terrane of Liaodong region[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2003, 18: 21-28 (in Chinese). [张鹏程,刘如琦,郭万超.辽东地区前寒武纪地体金矿化特征[J].地质找矿论丛,2003,18:21-28.]

[28] BARLEY M E, GROVES D I. Supercontinent cycles and the distribution of metal deposits through time[J]. *Geology*, 1992, 20: 291-294.

[29] PHILIPS G N. Gold deposits of Victoria: A major province within a Palaeozoic metasedimentary succession [A]. *WorldGold '91, Aust, Inst Min. Metal., Melbourne*[C]. 1991, 237-245.

[30] ZHANG Q S, YANG Z S, GAO D Y, et al. *Geology and Gold Deposits in the Jinchangyu High-grade Terrains, eastern Hebei Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991. 396-398 (in Chinese). [张秋生,杨振升,高德玉,等.冀东金厂峪地区高级变质区地质与金矿[M].北京:地质出版社,1991.396-398.]

[31] NIU S Y, SUN A Q, SHAO Z G, et al. *The Multiple Evolution of Mantle Plume and Its Mineralization* [M]. Beijing: Seismological Press, 2001. 1-225 (in Chinese). [牛树银,孙爱群,邵振国,等.地幔热柱多级演化及其成矿作用——以华北矿聚区为例[M].北京:地震出版社,2001.1-225.]

[32] LU Huanzhang, CHI Guoxiang. Geochemical characteristics of ore forming fluids in shear zone hosted Archean gold deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 1996, 3: 19-38. [LU Huanzhang, CHI Guoxiang. 太古宙剪切带金矿床成矿流体的地球化学特征[J].地学前缘,1996,3:19-38.]

[33] ZHONG Z Q. Fluid-rock interaction in shear zone[J]. *Earth Science Frontiers*, 1996, 3: 209-215 (in Chinese). [钟增球.剪切带的流体-岩石相互作用[J].地学前缘,1996,3:209-215.]

[34] SUN X M. Two kinds of brittle structures in ductile shear zone and their controlling significances for gold mineralization[J]. *Acta Scientiarum Naturalium, Universitatis Sunyatseni*, 1998, 37: 98-102 (in Chinese). [孙晓明.韧性剪切带中的脆性构造及其对金矿化的控制[J].中山大学学报(自然科学版),1998,37:98-102.]

[35] HUA Y G, LIU S W. Fluid infiltration, mass transfer and volume variance in the ductile shear zone[J]. *World Geology*, 1999, 18: 1-8 (in Chinese). [华永刚,刘树文.韧性剪切带内流体作用及成分变化与体积变化[J].世界地质,1999,18:1-8.]

[36] LI X F, HUA R M. A study on fluid action in the ductile shear zone: A review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2000, 19: 333-340 (in Chinese). [李晓峰,华仁民.韧性剪切带内流体作用的研究[J].岩石矿物学杂志,2000,19:333-340.]

[37] WEI J H, ZHANG D H, WANG S Y, et al. Discrimination study on fluid/rock interaction within metallogenic and non-metallogenic sections in shear zone[J\]. *Scientia Geologica Sinica*, 1999, 34: 473-484 (in Chinese). [魏俊浩,张德会,王思源,等.剪切带中矿化与非矿化地段流体-岩石相互作用差异性研究[J].地质科学,1999,34:473-484.]

[38] QIN D J. The coupled relationships between shear zone and deep-derived fluid and mineralization[J]. *Geology-Geochemistry*, 1997, 3: 58-63 (in Chinese). [秦大军.韧性剪切带作用与深源流体演化和金矿化的耦合关系[J].地质地球化学,1997,3:58-63.]

[39] LOUCKS R R, MAVROGENES J A. Gold solubility in supercritical hydrothermal brines measured in synthetic fluid inclusions[J]. *Science*, 1999, 284: 2159-2163.

[40] ROBERT F, BOULLIER A M, FIRDAOUS K. Gold quartz veins in metamorphic terranes and their bearing on the role of fluids in faulting [J]. *J Geophysical Research* (B), 1995, 100:12861-12879.

[41] KERRICH R. Nature's gold factory[J]. *Science*, 1999, 284: 2101-2102.

[42] DENG J, ZHAI Y S, YANG L Q, et al. Dynamic simulation of tectonic fluid metallogenic system in shear zone[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6: 115-126 (in Chinese). [邓军,翟裕生,杨立强,等.剪切带构造流体成矿系统动力学模拟[J].地学前缘,1999,6:115-126.]

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[43] SIBSON R H, ROBERT F, POULSEN K H. High angle reverse faults, fluid pressure cycling, and mesothermal gold quartz deposits [J]. *Geology*, 1988, 16: 551-555.

[44] SIBSON R H. Fault structure and mechanics in relation to green stone gold deposits[A]. *Nuna Conference on Green stone Gold and Crust Evolution, D'Or*[C]. 1990, 54-60.

[45] BOULLIER A M, ROBERT F. Paleoseismic events recorded in Archean gold quartz vein networks[J]. *J Struct Geol*, 1992, 14: 161-179.

[46] COX S F. Faulting processes at high fluid pressures: an example of fault valve behavior form the Wattle Gully Fault, Victoria, Australia [J]. *J Geophysical Research* (B), 1995, 100: 13007-13020.

[47] BONNEMAISON M, MARCOAX M. Auriferous mineralization in some shear zones: A three-stage model of metallogenesis[J]. *Mineralium Deposita*, 1990, 25: 96-104.

[48] LIU J M, ZHAO S R, LIU W, et al. Ore-forming fluid systems in crust[J\]. *Advance in Earth Sciences*, 1998, 13: 161-165 (in Chinese). [刘建明,赵善仁,刘伟,等. 成矿地质流体体系的主要类型[J]. 地球科学进展,1998, 13: 161-165.]

[49] TU G Z. Recent progresses on the studies and searches for superlarge mineral deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 1994, 3: 45-52 (in Chinese). [涂光炽. 超大型矿床的探寻与研究的若干问题[J]. 地学前缘,1994, 3: 45-52.]

[50] DUAN J R, HE S X, ZHOU C Z. Shear zone type gold deposit —A case study on the Hetai gold deposit, Guangdong Province[J]. *Geology and Prospecting*, 1992, 6: 6-11 (in Chinese). [段嘉瑞,何绍勋,周崇智. 剪切带型金矿——以广东河台金矿为例[J]. 地质与勘探,1992, 6: 6-11.]

[51] JI J S, XUE C J, ZENG Z R, et al. Study on the Kanggurtag gold zone in the eastern Tianshan Mountains[J]. *Geological Review*, 1997, 8: 1-6 (in Chinese). [姬金生,薛春纪,曾章仁,等. 新疆东天山康古尔塔格金矿带研究[J]. 地质论评,1997, 8: 1-6.]

[52] YANG X K, JI J S, ZHANG L C, et al. Basic features and gold prognosis of the regional ductile shear zone in eastern Tianshan[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 1998, 22: 209-218 (in Chinese). [杨兴科,姬金生,张连昌,等. 东天山大型韧性剪切带基本特征与金矿预测[J]. 大地构造与成矿学,1998, 22: 209-218.\]

[53] ZHANG L C, JI J S, ZENG Z R, et al. The ductile shear zone and its ore-controlling process —An example from Kanggur gold deposit, Xinjiang[J]. *J Precious Metallic Geology*, 1999, 8: 1-6 (in Chinese). [张连昌,姬金生,曾章仁,等. 韧性剪切带及其控矿作用——以新疆康古尔金矿为例[J]. 贵金属地质,1999, 8: 1-6.]

[54] WANG Yitian, MAO Jingwen, WANG Zhiliang, et al. The Kanggur and Matoutan gold deposits, eastern Tianshan, Xinjiang[A]. MAO J W, GOLDFARB R J, SELTMANN R, et al. *Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan*[M]. London: CERCAMS, Natural History Museum, 2003. 271-282.

[55] WANG Y T, LI J L. Fault-related tectonics of the strike-slip faulting [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1999, 18: 30-34 (in Chinese). [王义天,李继亮. 走滑断层作用的相关构造[J]. 地质科技情报,1999, 18:30-34.]

[56] WANG J L, LIU Y J, WANG Y S. Ductile shear zone and the relationship with gold deposits in Shenlidaban gold field, Xinjiang[J]. *Northwest Geoscience*, 1994, 15: 20-26 (in Chinese). [王居里,刘养杰,王润三. 新疆胜利达坂金矿区韧性剪切带与金矿关系[J]. 西北地质科学,1994, 15: 20-26.]

[57] MAO J W, YANG J M, ZHANG Z C, et al. Geology, geochemistry and genesis of the Hanshan ductile-brittle shear zone gold deposit in Gansu Province[J]. *Mineral Deposits*, 1998, 17: 1-13 (in Chinese). [毛景文,杨建民,张招崇,等. 甘肃寒山剪切带型金矿床地质、地球化学和成因[J]. 矿床地质,1998, 17: 1-13.\]

[58] ZOU G F, MAO J Y. Relationship between tectonic evolution and gold deposit in Garze-Litang fracture zone[J]. *J Chengdu University of Technology*, 1998, 25: 233-240 (in Chinese). [邹光富,毛君一. 甘孜—理塘断裂带构造演化与金矿的关系[J]. 成都理工学院学报, 1998, 25: 233-240.]

[59] XIAO L, ZHOU Y J. Ore control features of structure in Gezhen gold belt, Hainan[J]. *Gold Geology*, 1998, 4: 22-26 (in Chinese). [肖力,周遗军. 海南戈枕金矿带构造控矿及其成矿特征[J]. 黄金地质,1998, 4: 22-26.]

[60] LIU W H, LIAO Q L, DAI T G, et al. Preliminary analyses on minerogenetic characteristics of gold deposits related to ductile shear zone in southern margin-area of Altay[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 1999, 14: 42-49 (in Chinese). [刘悟辉,廖启林,戴塔根,等. 阿尔泰南缘与韧性剪切带有关金矿床成矿特征浅析[J]. 地质找矿论丛, 1999, 14: 42-49.]

[61] KANG R H. Ductile shear zone and gold mineralization in Miao'ershan, Hunan[J]. *Gold Geology*, 2000, 6: 23-27 (in Chinese). [康如华. 湖南苗儿山韧性剪切带与金矿化[J]. 黄金地质, 2000,6:23-27.]

[62] TENG Y G, ZHANG C J, NI S J, et al. Mineralization tectono-geochemistry of the ductile shear zone in the Tianwan gold ore field[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2001, 25: 95-101 (in Chinese). [滕彦国,张成江,倪师军,等. 田湾金矿田韧性剪切带成矿构造地球化学研究[J]. 大地构造与成矿学,2001, 25: 95-101.]

[63] HAO L B, LI D C, LU Z C, et al. Eerguna River ductile shear zone and its relation to gold mineralization in Inner Mongolia[J]. *Gold*, 2001, 22: 7-10 (in Chinese). [郝立波,李殿超,吕志成,等. 内蒙古额尔古纳河韧性剪切带与金矿化[J]. 黄金, 2001, 22: 7-10.]

[64] JIA G, CHEN H G. Gold-bearing shear zone ore deposit and gold prospecting in the metamorphic terrain, northern Jiangsu[J]. *Chinese Geology*, 2001, 28: 25-31 (in Chinese). [贾根,陈火根. 含金剪切带型金矿及苏北变质岩区金的找矿方向[J]. 中国地质, 2001, 28: 25-31.]

[65] ZHANG S H, ZHOU X Q, JI Z S. Ore-controlling model of ductile-brittle shear zones —Examples from the gold deposits in Tomorite re-

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

gion, Wulan County, Qinghai Province[J]. *J Mineral Petrol*, 2003, 23: 37-41 (in Chinese). [张拴宏,周显强,纪占胜. 韧-脆性剪切带构造控矿演化模式——以青海省乌兰县托莫尔日特金矿区为例[J]. 矿物岩石,2003, 23: 37-41.]

[66] MO J P, HUANG J. Prospecting of shear zone type gold deposits in Longsheng area, northern Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2003, 17: 17-19 (in Chinese). [莫江平,黄杰. 桂北龙胜地区剪切带型金矿找矿进展[J]. 矿产与地质, 2003, 17: 17-19.]

GOLD MINERALIZATION RELATED TO THE SHEAR ZONE

WANG Yi-tian[1], MAO Jing-wen[1,2], LI Xiao-feng[1], YANG Fu-quan[1,2]

(1. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*;
2. *Faculty of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Gold deposits related to the shear zone are well developed globally, which are often the large or super-large deposits. The shear zone is just like the nature's gold workshop, whose strain features and tectonic evolution control the gold mineralization. Ore-forming elements are mainly derived from the deep and country rocks, and the ore-forming fluids, the C-H-O system, are multi-sourced. Temperature and pressure inside the shear zone directly affect the migration of ore-forming fluids and the precipitation of ore-forming elements. The "fault-valve" model and the three-stage model are the keys to understand the gold metallogenic mechanism related to the shear zone. Tectonic superimposition and tectonic regime transformation occurred during the tectonic evolution of shear zone would result in the multiphase and complexity of mineralization and can improve the gold mineralization to a larger scale, resulting in giant gold belts or gold clusters.

Key words: shear zone; tectonic superimposition; ore-forming element; ore-forming fluid; gold mineralization; metallogenic mechanism

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net