

构造地质在沉积岩金矿勘探及采矿中的应用

Stephen G. Peters

(美国地质调查所 雷诺分所, 美国 内华达 雷诺)

摘要: 构造地质是进行区域、矿区及矿体勘探和开发的重要方法, 确定矿区主要构造事件的时限可以建立流体通道及矿床成因模式的推论。构造地质最实际的用途是测定矿体构成的各种要素, 可直接用于矿石储量估算、地面控制、品位控制、安全问题和矿山设计; 矿区和区域尺度的构造地质研究可直接用于长远战略规划、经济分析及矿权等问题。

沉积岩金矿床的矿体是一些不连续的内生或后生地质体, 通常赋存于断裂带、角砾岩体或岩层(岩性单位)中。矿体的这些标志使构造地质可以直接用于矿山和沉积岩金矿床的勘探。矿体的内部成分通常反映了不同的含矿建造, 矿体的主要成分是矿石矿物、脉石和蚀变, 它们通常以互相混杂的结构产出, 它们之间的关系可用于解释矿体的形成过程及矿体的控制因素。

矿体的位置与形状一般受扩容带的方位、产状、倾斜、岩性接触带及相互交切的变化所控制。此外, 一些概念参数(如矿区组构、可预测的距离和排列)也都可用于了解矿体的几何形态, 用一些定性的概念, 如矿体的内外倾伏、矿区的倾伏及排列、流体通道的类型、地球化学、地质压力、地温梯度及翘曲可对矿区内矿体的位置及几何形态的控制进行不同程度的预测。这些概念在大部分矿区的矿产勘查中已有实际的和经验上的应用, 但这是很宽泛的和通常所知的应用, 不能表达已知的或推断的成矿作用。

关键词: 沉积岩金矿; 构造地质学; 勘探; 采矿; 美国内华达; 中国

中图分类号: P613; P618.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2002)01-0001-18

1 引言

弄清后生的或构造控制的矿体并预测它们的位置、形态和产状, 通常是经济地质学家最关心的问题。因为各个矿区的地质特征和历史、所用术语及构造方法都不相同, 所以每个矿区的矿床开采也不尽相同。近几年, 内华达北部沉积岩金矿发现速率的提高导致了传统的和新的构造方法在这些矿床中的应用。沉积岩金矿的特性, 尤其是其主要赋存于不坚硬的、变质程度低或未变质的、遭受了普遍破碎的沉积岩里, 使构造地质成了勘探、发现和开采这种矿床的一个重要方法。

Peters 等(1998, 2000), 罗孝桓(1993, 1994, 1996)相继提出了美国内华达和中国的沉积岩金矿床是同变形或造山作用期间沉淀的观点。内华达地

区部分沉积岩金矿已经表明其形成是与区域变形同时的, 许多矿石显示出同变形的结构特征。

美国内华达和中国沉积岩金矿床的含金流体形成于变形期间的室外内证据, 显示了上地壳流体与局部变形事件之间的相互作用。这些变形事件被认为是深部地壳成矿环境中流体与变形相互作用的拉伸变形, 它们与许多浅成热液矿床所具有的地壳高位脆性变形不同, 与之有关的矿体很可能是在一些伴有大量流体活动的构造事件期间形成的。沉积岩金矿所在环境中的这些作用包括断层、剪切带和沿伊利石-粘土蚀变带、脱钙岩带发育的断层泥。蚀变及脱钙岩带继续进行热液蚀变, 导致流体通道沿线孔隙度和流体流量的增加。这些作用可能也与水裂带有关。上述这些环境还常常出现压力和温度的波动, 导致矿体形成期间流体化学成分的变化。

沉积岩金矿体的构造控制与多期构造事件形成的区域或矿区组构有关(图1)。几个矿体成群出现可

收稿日期: 2001-08-22; 修订日期: 2001-12-13

作者简介: Stephen G. Peters(1948-), 男, 研究员, 博士, 1987年在澳大利亚 Cook 大学获地学博士学位, 先后在南非、美国、澳大利亚任矿山地质评估师、矿山总地质师、主任地质师、研究员等职, 长期从事金矿勘查和研究工作。

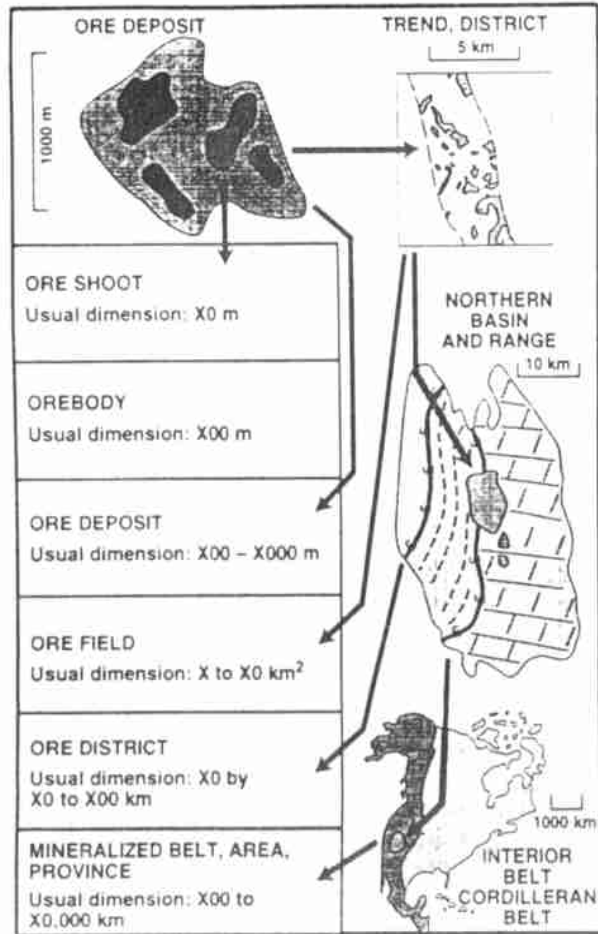


图 1 与本研究中美洲沉积岩金矿床有关的构造规模
Fig. 1 Regional scale fabric and grain may be manifested in small district- and orebody-scale fabrics and locally may control ore
区域规模的构造及其走向可以在小的矿区和矿体构造中反映出来, 并且在局部地方可能控矿(据 Storrar, 1981)

以形成一个不连续的大矿体, 如 Goldstrike 金矿的 Betze-Post-Screamer 矿体群。一些矿区的几个热液流体通道可能是连通的。一个矿区往往显示出同一个热液源的连通系统, 因此, 这个矿区显示了不同于其他矿区的相似的蚀变、矿化及构造控制特征。一个矿区的各个矿体的倾伏可能与整个矿区的几何形态有关。

本文总结并讨论沉积岩金矿研究中常用的构造方法与概念。此外, 还列举了美国内华达和中国的沉积岩金矿床中同变形矿石的实例。

2 构造地质学的应用

地质学家在矿体的发现、设计和开采中的作用

是至关重要的。因为矿体是地质体, 具有独特的矿物组合、地球化学特征、岩石强度和形态。矿体勘探和开采的实践表明, 构造地质主要根据含矿围岩的岩性和构造研究矿石的形态及地质问题。构造地质方法是对矿体进行测量的唯一手段, 地质师和工程师测量使用的都是构造地质的方法。一些技术和方法, 如矿石储量估算, 品位控制, 矿山设计及其他许多常规采矿作业的依据都是传统的构造地质方法(图 2 和图 3)。

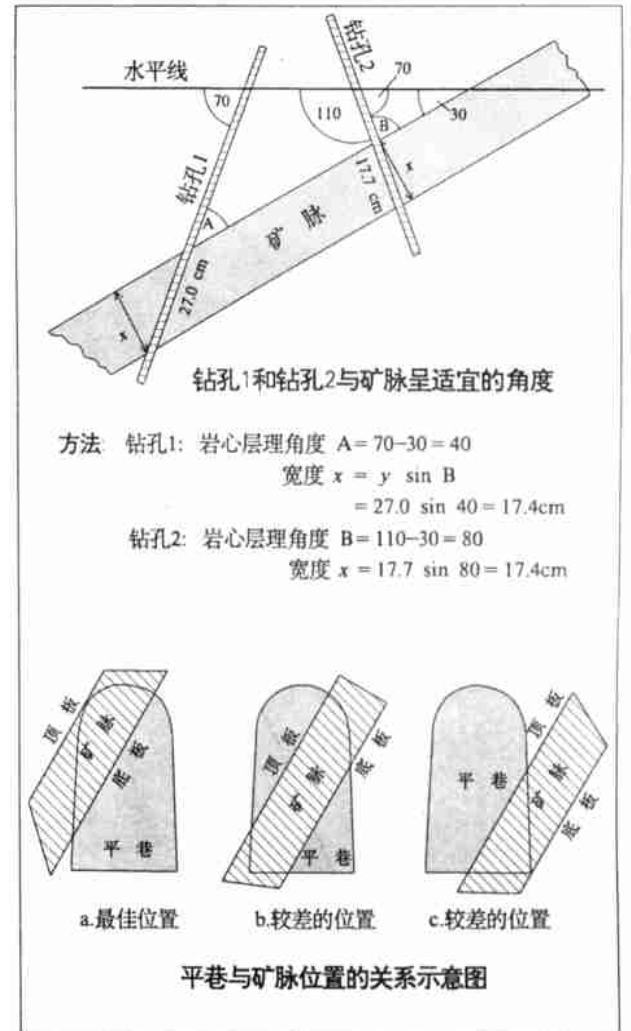


图 2 构造(特征)在矿体测量和矿山设计中的应用简例
Fig. 2 Simplified examples of use of structural features for measurement ore and mine design
(A) 表示钻探、取样或地下开拓过程中其倾角(向)的确定及测量对矿体准确定位及其储量的准确计算的重要性;(B) 表示根据产状布置的地下工程与矿体相对位置的关系(据 Storrar, 1981)

沉积岩金矿矿体的构造特性为它们是不连续的深成体, 赋存于某些可能是流体通道的构造或岩性单元中。这些构造和岩性单元(如界面、岩性分界、脉

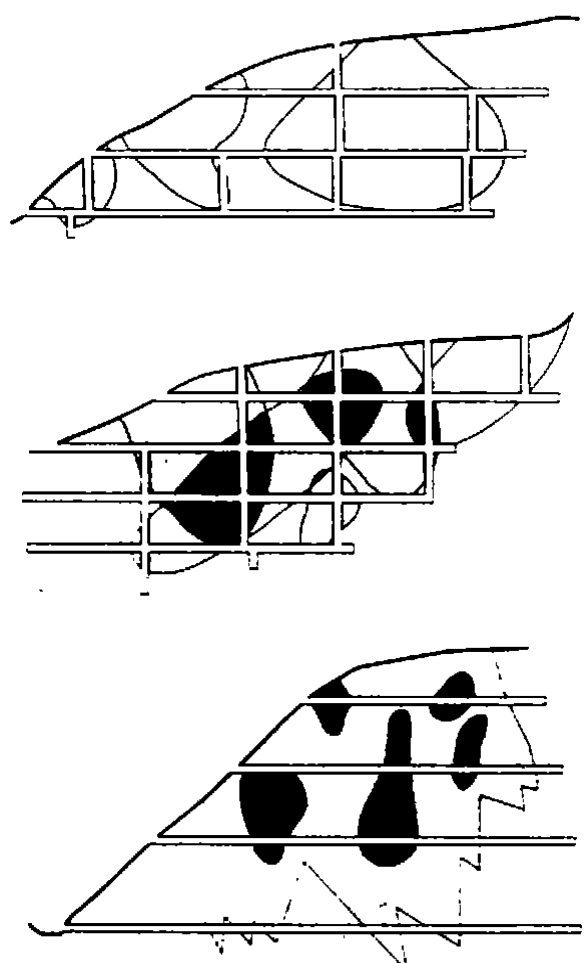


图 3 矿山设计与矿体形状、大小关系的纵投影示意图

Fig. 3 Longitudinal projections of relations among mine layout and site of the ore body

运用构造地质确定矿体及富矿体的形状、位置、地面控制,从而布置采矿工程。

体、剪切带、裂隙、断裂带、特定的岩性段) 统称为通道。矿体的几何形态是由宽度、走向长度(大于 3 000 m)、倾向、倾伏长度表示。矿体比通道其他部位的金属品位高。大部分矿体的质量为 2 万~1 000 万 t。矿体和通道系统的部位按其所在断层系统的部位命名(Ramsay 等, 1983, 1987)。

矿体一般是中心部位、凸出部位、或沿其一侧厚度大并且矿石富, 矿石的品位分布不均一。矿体可能突然消失, 也可以尖灭或逐渐过渡到边界品位。一般情况下, 突然消失是地质特征变化了, 如出现了断层、岩性或蚀变界线。沉积岩金矿的厚度通常是 10~300 m。次要的矿化带可能与主矿体相连。矿体可能呈平卧状、脉状、筒状, 甚至网脉状(Peters 等, 1998)。矿体的倾伏方向是指从矿体中(最佳拟合)轴水平方向开始向下的那个指向。矿体的侧伏是指其

中心轴和水平轴在同一个平面中的夹角(Lindgren, 1933)。

3 内部组分

受构造控制的矿体特征具有复杂性。其矿物组成通常反映出成矿的不同阶段。矿体由一定的矿物组合构成, 并与矿体之外的矿物组合和岩石类型不同。矿体之间的围岩和流体通道(脉石、蚀变矿物组合和断层泥)被分成废石或低品位矿石。

所有矿体的内部组分都是矿石矿物、脉石矿物和热液蚀变组合。这些组分通常呈复杂的形式混杂在一起, 这些产出关系可以解释矿体的形成过程及其生成顺序。根据矿物分带、生长类型、连生及接触边、杂质及反复出现的判别可以推断矿体形成历史。

内部组分之间的结构关系可以用来判别矿体的成矿作用。在矿体中发现的结构可以反映通道中成矿前、同成矿期、或成矿后的事件。多期的热液, 不同的断层活动, 以及化学交代都具有特殊的结构特征。含矿流体通常流向多次发生构造活动的部位, 那里可能存在有成矿前的复杂构造并具有高渗透性。在矿体和流体通道之间或内部, 矿石结构是经常变化的。例如: 矿石矿物和脉石矿物可以胶结角砾状围岩物质, 或者角砾状矿石和脉石矿物被后期的矿化物质所胶结。在造山或同变形类型的沉积岩金矿中这些特征很常见。矿体的内部组分在矿化岩石中、热液通道中、以及与成矿有关的热液蚀变带中形成不同类型的结构和矿物组合。

3.1 矿化岩石

沉积岩金矿床深成矿体的金含在浸染状的硫化物中。最有价值的、完全氧化的这类矿体中含有一些自然金。未氧化的矿石矿物通常与石英、碳酸盐类矿物共生, 在主要流体通道周围蚀变带的围岩及其围岩包体的脉(细脉)中呈浸染状产出。矿石矿物的沉淀可能是同时的、连续或叠加的。在金的成矿期间矿石的沉淀从形成浸染状的黄铁矿开始, 其后是富砷黄铁矿; 与此同时微粒级的金呈单独的相沉淀下来, 或包含在早期黄铁矿的富砷边中(与 Well 和 Mullen, 1973; bakken 等, 1989; Arehart 等, 1993; Fleet 和 Hamid, 1997 等人所论述的相似)。大部分研究者认为, 矿石相的时间关系为具有富砷边的富金黄铁矿矿石早于富雌黄、雄黄、重晶石、辉锑矿和汞矿的矿石。这一生成顺序与典型卡林型系统的地球

化学模型得出的结论相同。卡林型系统的条件是水-岩反应和中等盐度($w(\text{NaCl}) < 10$)的热液系统的温度从 $210 \sim 200$ 下降到 $180 \sim 150$ 。脉石矿物的结构可以帮助说明矿体的历史。石英、伊利石-粘土和碳酸盐矿物在大多数沉积岩金矿矿体中是最常见的脉石矿物,几个阶段形成的石英以不同的结构产于沉积岩金矿中。

3.2 流体通道的岩石

矿液通道可以是区域规模的、矿区规模的,也可以矿体规模的,其中充填有压碎的围岩角砾、断层泥、千糜岩、粘土层和叶片状岩石,并混有脉石和蚀变围岩。这些组分是矿体如何形成、成矿物质如何活化的重要证据。在许多情况下,断层岩的岩性与围岩的岩石类型直接有关(Sibson, 1977; Snoke 等, 1998)。例如,石英断层泥在花岗岩或砂岩围岩中很

普遍,而在泥质岩里形成最多的是蒙脱石、伊利石和富白云母的千糜岩及粘土层(fluchan)。流体通道内及其附近的断层泥类型、数量或厚度可能与断层面所在部位的相对移动量呈正比(Robertson, 1983; Hull, 1986; Walsh 和 Watterson, 1988, 1989),还可能指示比较强的剪切或挤压而不是扩容带所处的特殊位置。

许多沉积岩金矿床及其相伴的流体通道部分或全部由不同类型的角砾岩组成。最重要的类型是沉积、塌陷、脱钙角砾岩及构造、热液角砾岩,统称多成因角砾岩。查明角砾岩的类型是进行沉积岩金矿床勘探和开采的一个重要因素。例如,脱钙、泥化、硅化和变形通常叠加在早期的脱钙和塌陷角砾岩上,而后者又可能是叠加在沉积角砾岩上的(图4)。矿石可能产于一种或几种角砾岩中。

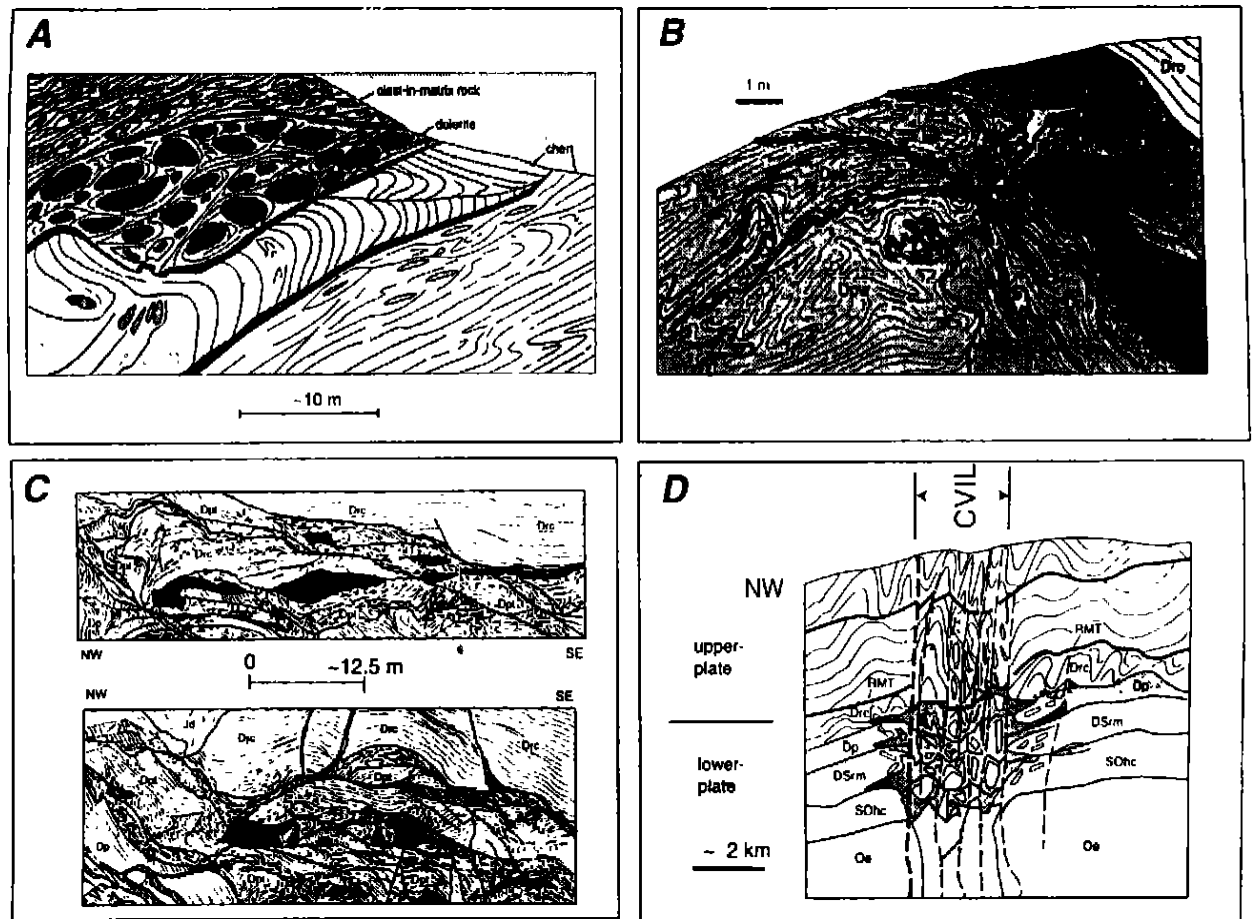


图4 由溶解作用引起的沉积岩金银矿区矿床和流体通道规模的变形结构

Fig.4 Examples of ore deposit and conduit-scale deformation textures in sedimentary rock-hosted Au-Ag deposit areas resulting from dissolution

(A) 卡林矿区上盘岩石中的混杂堆积岩结构; (B) Betze 金矿 Popovich 灰岩与 Rodeo Creek 岩组之间的接触关系; (C) Goldstrike 矿区 Betze 矿体附近 Popovich 组与 Rodeo Creek 岩组之间的接触关系; (D) 位于 42 纬度附近的新月谷-独立矿线性构造(Cressent Valley-Independence Lineament, CVIL)理想剖面图。详见 Peters 等(1998)和 Peters(1997, 2000)的文章。

3.3 热液蚀变

矿体规模的蚀变分带可反映吸纳、集中矿液流体的扩容带(Rose and Burt, 1979)。围岩中出现有椭圆状的含矿蚀变核,中央是矿体,外围是同一通道内的与矿体倾向、走向一致的边缘蚀变带。边缘蚀变带在化学与热能上与含矿蚀变有关,通常含有低品位

的矿化。在同一通道内可能出现不含矿的蚀变,尽管是同一矿化事件的组成部分,但显示的化学和热能条件却不能形成矿化。与矿无关的蚀变是成矿前和成矿后的蚀变(Lovering, 1949),通常产在含矿通道的外面(图 5)。

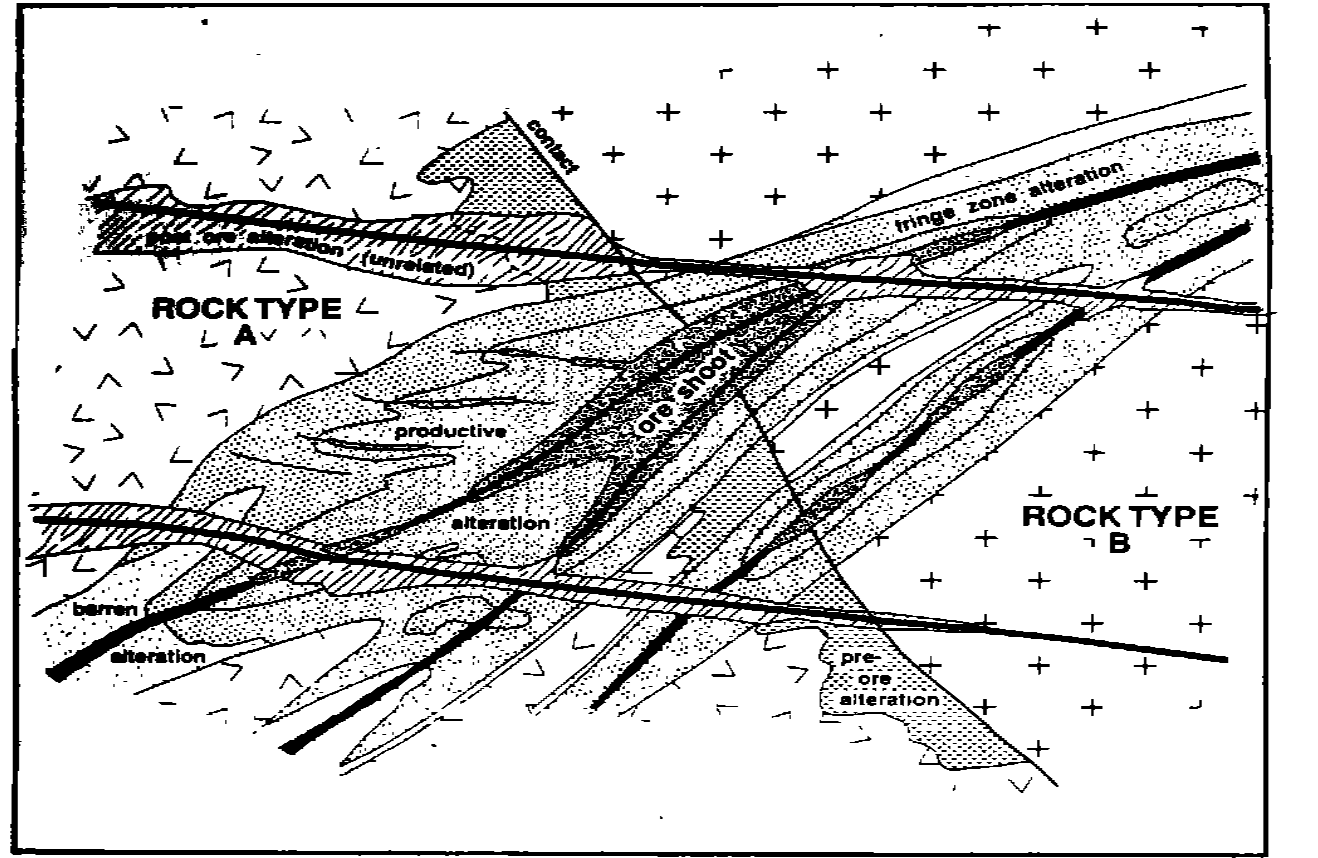


图 5 两类岩石之间接触带附近假定富矿体的平面或剖面草图
Fig.5 Sketch of a plane or section of an hypothetical oreshoot at a contact between two rock units(t's and v's)

不含矿的成矿前蚀变可能提供了早期的成矿条件,含矿蚀变包围且与富矿体直接接触,边缘蚀变产在含矿蚀变的外围,不含矿蚀变可能也与矿化事件的同一流体有关,但显示不同的化学或物理条件,成矿后蚀变通常与矿化无关,但可以局部叠加在矿化之上(Peters, 1993b)

蚀变矿物组合的发育受断层泥的限制,表明热液流动局限在高渗透率的通道内。矿体周围宽大的蚀变晕表明该部位是裂隙中流体流动最多的部位,也是孔隙度最大和向围岩侧向渗透最大的部位。此外,在同一通道内较活泼岩石产生的蚀变晕比不活泼岩石的宽。沉积岩金矿宽达 1 500 m 的蚀变带及强烈而广泛的脱碳酸盐作用表明流体的流量极大。

热液蚀变对高流量部位的围岩产生物理、化学变化,因此直接影响矿体的形成。这些变化使局部的岩石变软或变硬(成矿前提)。岩石变软(泥化或透入性的粘土蚀变)形成较弱的带,控制其后产生剪切和

断裂的位置;岩石变硬则导致围岩刚性增强、有利于破碎、角砾岩化、增加渗透性。成矿的化学条件也是由热液蚀变奠定的(Coveney, 1981; Woitsekhowskaya 和 Peters, 1998),如果蚀变过程是放热的还可以为系统增加热能(Cathles, 1977)。蚀变在成矿条件中既起了化学作用又起了物理作用,如断层的扩展为矿体的形成带入硅质并产生热量。由于蚀变矿物的张性强度比未蚀变围岩小,所以加强了剪切带中的伊利石-粘土蚀变带和断层的活动。泥化也可以通过水化粘土矿物放出或吸收含盐流体从而影响流体的演化,面状的伊利石-粘土千糜岩带

可以形成影响流体流动通道的局部压力封闭(Wang 和 Mao, 1979; Wang, 1979; Moore 等, 1989)。

在沉积岩金矿床中与矿化岩石有关的蚀变类型包括碳化(碳的加入)、脱碳酸盐化(近似于脱钙化)、泥化(伊利石-粘土)和硅化。这些蚀变与 Radtke (1985), Bakken 和 Einaudi (1986), Kuehn 和 Rose (1992) Arehart (1996) 等所论述的其他卡林型矿床的蚀变类型相似。金矿成矿前的蚀变矿物组合包括沉积岩同生的和成岩的矿物, 以及成矿前的接触变质或变质交代矿物。矿体内部的局部含碳区在变形历史中可能具有重要意义, 因为它们代表的是低剪切强度区, 因此通常是高应变区。这些岩石中的粘土矿物是随变形和蚀变同时生长的。硅化的角砾岩体和破碎带在构造上是独立的, 被千糜质伊利石粘土层或断层泥包围, 也可以指示硅化后的剪切运动。

4 矿体位置和形状的构造控制

矿体大都产于由产状变化、分叉、岩性接触及交切引起的扩容带里。此外, 概念参数(如下面将要定义的矿区组构、“神奇”的距离及矿体的排列)也是确定和测量矿体的有用工具。张性应力区和大应变带内的低平均应力区及张、剪破碎带通常是成矿有利地段。正如 Bateman (1942) 指出的, 控制矿体的确切因素和成因问题基本上还没有解决。但是, 一般说来用矿体内部组分的构造分析解释成矿基本条件及矿体生长的各个阶段还是可行的。这些概念既适用于沉积岩金矿也适用于其他类型的金矿。

4.1 成矿基本条件

成矿基本条件是指一些有利于后来矿石沉淀的局部变化, 而且这些变化的出现早于成矿流体的到来。这一概念不同于矿化作用期间流体与围岩之间的动力反应促进矿体生长的概念。二者的区别是 Poulsen 和 Robert (1989) 提出的几何(geometric)矿体与运动(kinematic)矿体之间的区别。所谓几何矿体是指那些由矿体所在通道与有利的地质事件相互作用生成的矿体, 运动矿体指的是那些与活动韧性剪切和通道流体相互作用生成的有关矿体。有几种成矿基本条件能被辨认: (1) 通道的物理条件可以增加渗透性, 并为成矿流体的圈闭奠定基础; (2) 圈闭场所或矿区的化学条件; (3) 由贯穿地史的事件形成的特殊的矿区组构和圈闭。

4.2 产状的变化

业已证明, 含矿通道和地层走向、倾向的变化能够产生有利的扩张部位, 并且从倾向的变化上看, 适当走向的膝折通常出现正向和反向运动、在破裂面上形成对称的 Z 和 S 形 (Connolly, 1993; Newhouse, 1940; Emmons, 1948; Brown, 1957; Lyons, 1988; Kerrich 和 Allison, 1978; Guha 等, 1983)。矿体还出现在扩张的剪切环境及复杂构造破坏的部位 (Blanchard, 1936), 如先存的褶皱或韧性的、成矿前的剪切带。有一种特殊的倾向和走向变化叫做“折射”(Refraction), 其含矿通道的产状的变化与含矿岩石类型的产状一致, 正如 Knopf (1929) 和 Reid 等 (1975) 所论述、Treagus (1988) 和 Peters (1990) 所讨论的。

4.3 分叉

次级断层或马尾状构造可以形成张性区并定位矿体。分叉处平均应力的减少高达 20% (Chinnery, 1966a, 1966b), 并且可能是地震、扩张和热流集中的地方 (Segall, Pollard, 1980)。环流沿着分叉系统的透镜体, 两组主要的脉体由剪切分叉相连通, 形成双向构造。矿石通常形成于两条断裂之间挟持的部位、或靠近断裂转弯部位、或接近双向构造的封闭端、或张性裂隙中 (Teagle, 1990; Gemmel, 1988; Harley 和 Charlesworth, 1990)。分叉部位几何形态的复杂性及多期次运动可以产生局部的张性应力, 并在断层网系中形成流体压力和应力梯度, 增加渗透性, 使流体在断裂分叉部位中流动。运用 Tchalenko (1968) 总结的模式, 标准的脉和裂隙的走向可以在复杂的断层系或各种剪切带中预测或区分出哪些是张性的, 哪些是压性的。

4.4 岩性接触带

岩性接触带影响矿体的发育和分布。大部分矿体都出现在岩性接触带的一侧或另一侧, 并且矿体或其中富矿体的倾伏可能与裂隙和岩性接触带的交切一致。当层状岩系的岩性接触带被断层平移的时候, 围岩和矿体之间关系就会很复杂。岩性接触带是岩石坚硬程度、化学性质、热传导性能和孔隙度具明显差异的带。岩性可以影响通道和脉的形式: 在坚硬的岩石里张性脉与膝折带的边界平行, 而张性的裂隙和扩张脉则产于不坚硬的岩石里, 层理面断裂和鞍状脉是含矿构造与岩性接触带相互作用生成矿床的特例 (Behre, 1937; Cox 等, 1986; Tomlinson 等, 1988)。

4.5 断裂的交切

两个矿化通道的交切部位通常形成富矿体, 而且富矿体可在其中一个或两个通道中倾伏, 其产状与交切部位的产状一致。交切部位的几何形状, 如: x, t, y 形态和交切角度也会影响与成矿有关的蚀变形式和矿体的发育。矿体附近不含矿的横断层和非扩张裂隙的交切带产状可能与矿体倾伏一致。这些交切部位由于提供了比较大的表面积, 增加了局部断裂的密度, 形成温度、密度、压力和化学成分稍有差别的流体混合带, 从而使孔隙度增加, 有利于矿石沉淀。

4.6 矿区组构

每个矿区都有不同类型的岩石。这些岩石由于经历的地质历史不同, 故具有多种组构。矿体大都是叠加于先存组构上形成的(White, 1986; Raybould,

1976)。矿体的倾伏、位置和品位可能直接与矿化前存在的不同的几何形态有关。例如, 围岩中发育的矿物或交切线理可能与后来的含矿剪切带有关, 或为其所利用, 还可借此来确定一些矿体的倾伏。矿化溶解作用和相关变形就是以这种形式利用老的组构。在一些矿床中变形事件可能叠加在老的剪切带上, 并有侵入岩侵入于剪切带中(图 6, 图 7)。在卡林矿带上早期的同斜褶皱(F_1) 再次褶皱成了 NE 向褶皱。后来 NE 向的褶皱又经 NW 向的 F_3 剪切褶皱旋转成了 NW 向的褶皱。旋转成 NW 向的 F_2 的方向平行于卡林矿带的走向, 在局部地方(如 Betze) 的矿体沿 F_3 剪切褶皱定位。 F_2 褶皱既有向 NE 倾斜的, 也有向 SW 倾斜的。当 NE 向倾斜的褶皱群出现时就会形成薄弱带, 成为局部的 F_3 剪切褶皱的核心。

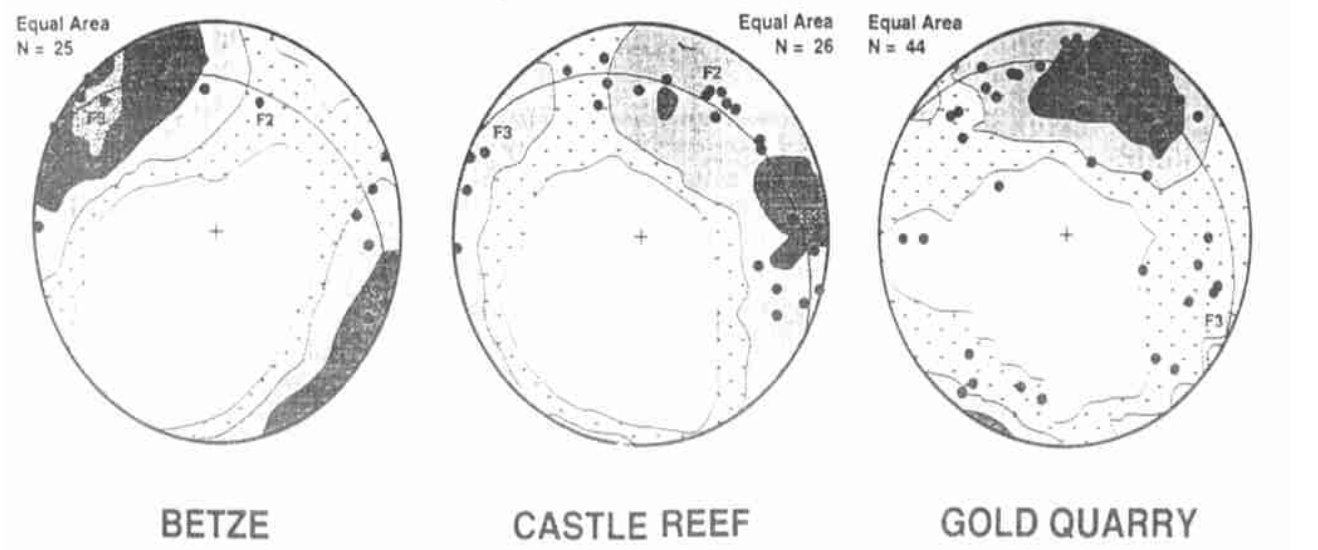


图 6 卡林矿带矿区的走向

Fig. 6 Examples of development of district grain along the Carlin trend

3 个赤平投影图分别显示 Goldstrike 金矿 Betze 矿床到卡林金矿南边的 Castle Reef(脉) 断裂带及金坑(Gold Quarry) 矿山以等值线表示的从南到北褶皱轴向, 这 3 个矿区具有 NE-SW 向 F_2 褶皱轴, 这些褶皱轴后来沿 F_3 剪切褶皱旋转成为 NW-SEE 向。

4.7 可以预测的距离

在一些矿区, 矿体形成于距地质接触带或沿通道一定距离的位置上, 这种距离根据经验是可以预测的。矿体和含矿通道之间的距离在空间上也可以呈周期的变化(Petersen, 1990; Campbell, 1990)。矿体中发现的以金属比率等值线几何形态表现的温度、压力和流体化学成分引起的梯度变化可以用来解释这种距离是可以预测的(Petersen 等, 1977; Loucks 和 Petersen, 1988)。这种实例包括矿体存在于含矿通道中距某接触带一定距离的部位, 或如 Kuttina 等(1967) 探讨的那样, 扁豆状的矿体按一定

的距离分布。可以预测的距离是在矿区中使用的传统的、经验的定性概念, 可以不反映可辩证的地质过程(图 8A)。

4.8 矿体的排列

在许多矿区里多个矿体通常从不同的含矿通道“向上”, 或沿某一特殊的、或可以预测的方向排列(Dickinson, 1942, 1944)。横断层、褶皱或其他构造也可以沿一个方向逐次排列。但是, 这一排列方向与可以预测的距离一样, 也是一个经验和定性的概念, 其与地质特征或地质作用的联系可能是微弱的, 在某些情况下根本不存在。矿体可以在不同的平面上排

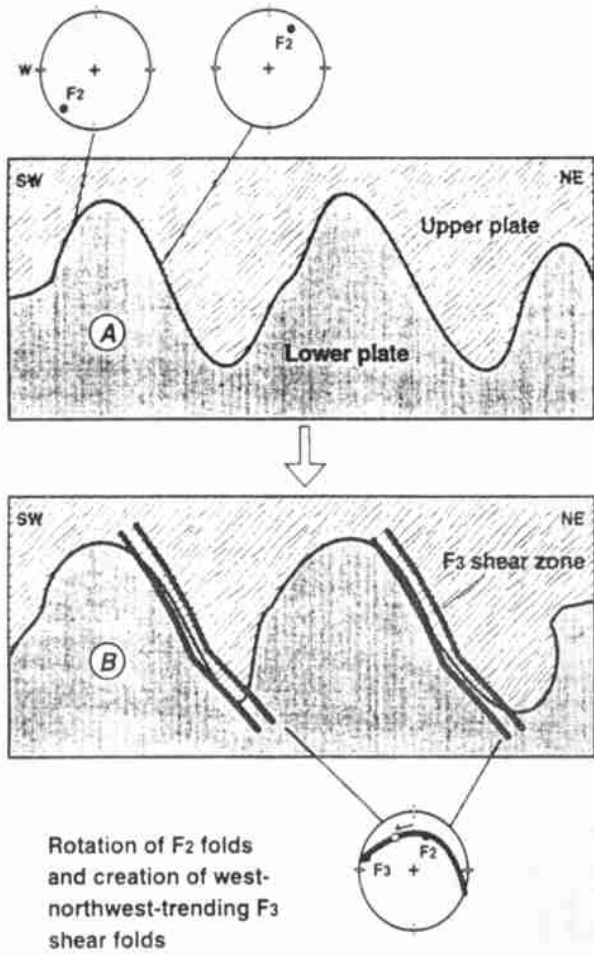


图7 用构造走向确定卡林金矿带断裂上盘之下金矿体位置示意图(见图6)

Fig. 7 Diagrammatic illustration of how structure grain in the Carlin trend area (developed in figure 6) can be used to locate hidden ore bodies beneath a tectonic plate (A) 断裂的上下盘经历了 SW-NE 轴向的 F_2 的褶皱作用; (B) NE 向 F_2 褶皱轴与 F_3 剪切褶皱共面, 当这种情况出现时形成剪切褶皱发育的核心地带。上盘岩石中的 NE 向褶皱轴带可能是 F_3 剪切褶皱发育的带, 这是已知的含矿围岩

列(图 8B), 矿体在一个含矿通道水平空间上的排列或周期性的出现可以定量成矿体的发育比率。这一比率是由整个通道的走向长度被矿体的长度来除得出的。矿体发育比率的典型用途是根据以前的生产(巷道或采场)在老矿区里估算出进行多大的开拓量才能揭露出一定数量的矿体。在一个矿区中和不同的矿区之间, 矿体的发育比率可以随通道的不同而变化。

5 矿区的控矿因素

矿体的位置及其几何形态在矿区尺度上是可以

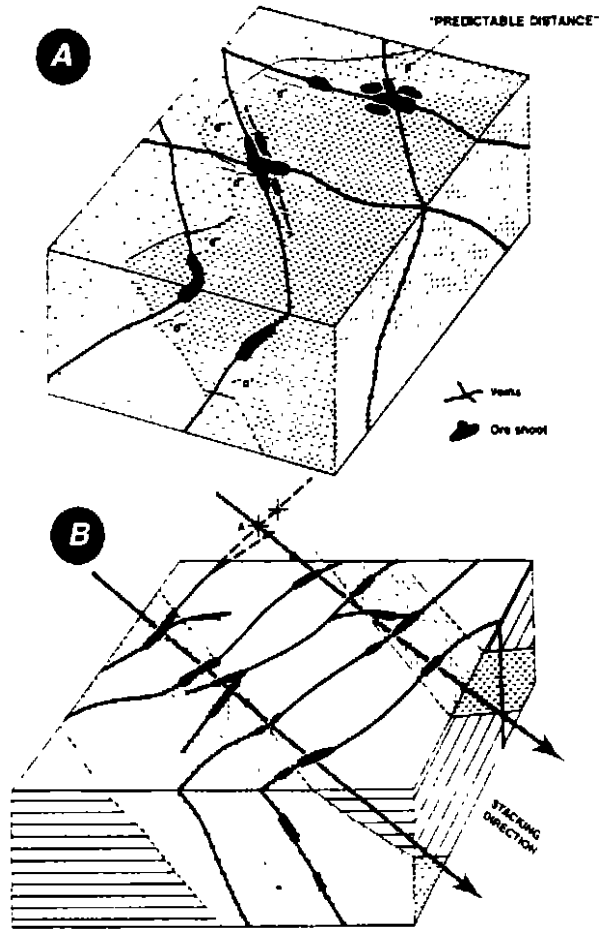


图8 矿体定位的概念控制模式

Fig. 8 Conceptual controls of ore body locations

(A) 具有两种岩石和两个方向脉体的假定地区中矿体“神奇”距离示意图。富矿体一般产在距花岗岩接触带一定距离的页岩(虚线)、或在接触带中。“神奇”距离的概念是经验式的, 不表示过程; (B) 具有交叉剪切带层状岩系地区矿体排列示意图。矿石带集中在剪切带与砂岩与页岩的接触带附近。矿体的位置跨越接触带, 但是点 A 很可能是下一个矿体的位置, 而不是点 B。这样的矿体排列是一种经验式的概念, 与构造分析不一致。也是一种三维的排列方式

预测的, 所用的定性概念是矿体内部和外部的倾伏, 及其矿区的倾伏和排列、通道的分类、梯度和翘曲等。这些概念在大部分矿区生产和探矿中都有实际应用, 但这只是一般的应用, 缺乏确切的解释。从一些方面看它们是矿体使用的矿区的相应概念, 但是它们叙述的是一些不同的预测方法, 显示的是矿体群排列的几何形态。

在一个矿体通道或矿脉中矿体可以这样的方式成群产出: 即矿体向一个方向倾伏(内部倾伏), 而整个矿体群却向另外一个方向倾伏(外部倾伏)。当矿体或矿体群以预测的几何形态排列或倾伏时就可以

确定矿区的倾伏。例如卡林矿带北中部的矿体群向 NW 缓倾, 但各个矿体倾伏方向又各不相同 (Peters 等, 1998)。当相同的几何形态出现时, 就可以描述矿区的倾伏, 而且可以表明矿体受地层控制, 或指明该区成矿流体的来源或通道。这一概念可以用来预测盲矿、未发现的矿区或矿区在深部的重现。当矿体成群出现或成组倾伏时就存在有矿区范围的排列。如果在原矿体群之外存在相同的条件 (例如, 重复出现的地质条件可以是一个次要的有利围岩, 如沉积岩或火山岩层; 或者是与已知的控矿横断层平行的次级横断层), 这些矿体群可以沿一个可预测的方向重复出现或排列。

正如 Ethridge 等 (1983) 指出的那样, 深断层作为高渗透性的通道, 可引导流体自深部流向矿体所在部位。矿区排列的不同通道及其某些部位可能表示的是深部连通上部彼此分离的流体流动的地方。一个地区, 矿体和矿体群上排列的各通道部位矿化特征大体相似, 但是它们的矿化强度、品位及构造控制是有差别的, 这种差别可能是由于相互分隔的每个通道流体的演化不同而造成局部的构造和化学条件的差异所引起的。流体演化的速率与其和母液分离的深度及其与围岩之间的不平衡有关。 $> 1\text{ km}$ 的几何体可以使不同的、或者是后来的流体有选择地经由各个矿区进入该区 (图 9), 这样就使一个矿区具有多个分开的流体通道、形成不同的成矿期 (Peters, 1991)。

5.1 通道的分类

矿区中存在的多种通道具有不同的特征, 其中一些通道更有利于成矿。许多矿体沿走向的长度大, 显示有剪切运动的组构及其他剪切特征 (Ramsay, 1980)。剪切运动伴随有走向长度比较短的、附属的拉伸或张性通道 (Ramsay 和 Hubert, 1983), 如支脉、连脉或交切脉构造。矿体多发育在张性构造中, 其中



图 9 流体流动模式及不同地区矿石类型差异的原因

Fig. 9 Model of fluid flow and cause of district ore type variation

作为通道引导矿化流体流动的、透入性的剪切带和劈理示意图。垂直的面 (斜线部分) 代表轴面和附近岩石中的剪切带。当流体进入这些垂直的面时就会发生隔离, 由于与其所在地特殊围岩的相互反应使原本均一的流体出现了不同演化, 因此可以圈出热和化学梯度来。成矿后的构造和成矿事件只能优先活化一种组构, 因此在比其早一些矿化的岩石上叠加一个构造组构, 而不是在其他的岩石上叠加这种组构 (Peters, 1991, 1992a)

流体流量及孔隙度是增加的。勘探和填图方法, 如底层土壤及岩石地球化学研究、蚀变研究、节理密度研究、不同方向含矿通道的系统取样可以在一个矿区或矿体中区分出哪些部位 (方向) 的通道流体的流量最大。这些部位是矿体中沉淀、富集金属的流体圈闭的同义语, 或是与这些圈闭是分开的。

Sverjensky (1984) 指出, 携带着金属的热卤水成矿流体在类似于内华达北中部沉积盆地的环境中运移距离可超过 100 km 。这一现象说明, 流体可以横向穿过罗伯茨山异地岩下盘的多孔隙钙质岩石 (图 4D)。如果这种成矿流体的成分与 Woitsekhowkawa 和 Peters (1998) 描述的成矿流体相似, 它就可以携带着金属在这些岩石中进行区域规模的运移并形成沉积岩金矿。因为这些岩石中的碳可以阻止金属的沉淀 (Crerar 等, 1985)。这些流体可以流到高渗透性的通道中, 同时伴随有变形、溶解、岩浆作用和地壳热流的提高。

许多区域规模的线性构造, 包括矿区规模的断裂和剪切带似乎在成金事件之前、之中、之后一直活动, 而成金事件形成了沉积岩金矿床 (图 10)。除了矿带及其伴随的褶皱、断层外, 区域规模的热液通道还可能包括: (1) 具渗透性的古生代富碳酸盐地层; (2)

硅质碎屑-碳酸岩构造边界或不整合面; (3) 区域规模的构造带及有关的断裂。在一些具渗透性的层位或由构造形成的层, 尤其是在穿越多个岩层的线形

构造中或其附近的层位里, 流体可以运移 10 多公里 (图 11)。与构造变形相伴随的流体在这些构造及其附近形成碧玉岩、硅化角砾岩、断层泥和千糜岩。

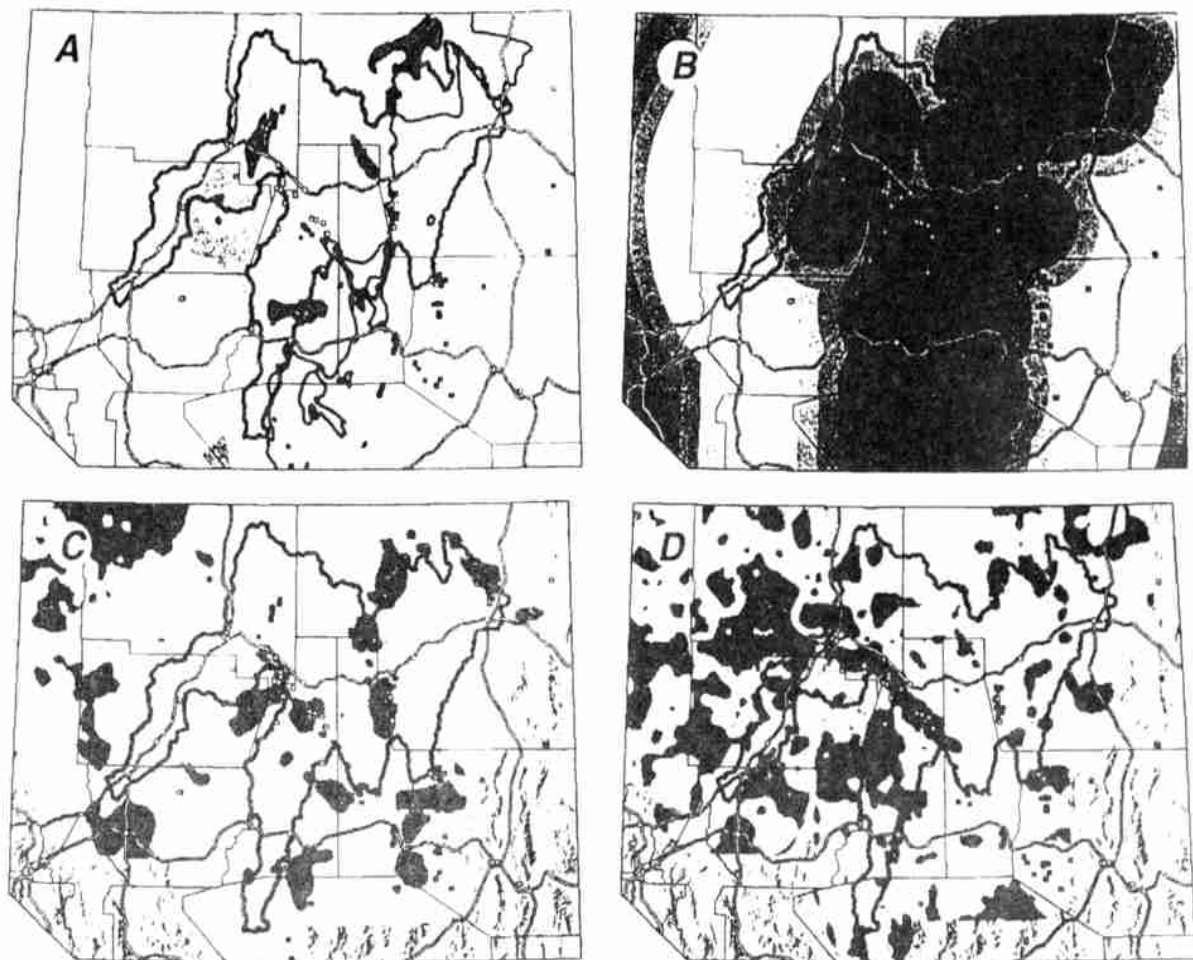


图 10 根据不同数据绘出的内华达北部地区区域规模的流体通道和构造

Fig. 10 Examples of regional scale conduits and structures portrayed by various data types in northern Nevada (A) 岩性构造体; (B) 罗伯茨山冲断裂; (C) Ba/Na NURE 分散流地球化学; (D) 铷 NURE 分散流地球化学。图中的方块为沉积岩金矿床。坐标及说明见 Wallace 等 (2001) 文章

5.2 梯度

当流体流动或向上穿过通道时, 由一种地质环境转向另一种地质环境, 流体化学成分、温度和压力的变化导致了矿石和脉石矿物的沉淀 (Edwards 和 Atkinson, 1986)。这些环境的变化有时可能与岩性接触带、变质级别和其他地质参数直接相关。应变、孔隙度、温度、压力和化学成分梯度可能由变质作用 (Henley 等, 1976; Kettich, 1986)、岩石类型的变化、断层或剪切带、褶皱、岩浆作用、流体流动速率或其他因素引起。从矿区尺度上看, 梯度的空间形式及幅度是控制矿体分布的重要因素。梯度可以在一个矿区中重复出现, 形成矿区性的倾伏和排列。

5.3 翘曲(warp)

在地区范围内大规模的宽缓褶皱可以局部叠加在含矿岩石和矿区之上, 使地壳的一些地区产生大面积扩张, 例如 1 km 规模的、圈闭石油和天然气的扩张带。这些翘曲一般形成于造山旋回的晚期, 因此沿老的紧闭褶皱或剪切带发育。晚期变形翘曲使早期构造张开。矿区中的翘曲带可以通过地区岩石分布、接触带形状及褶皱对称性的解释来辨别。用翘曲可以解释部分通道矿化而另一部分不矿化的原因, 因为只有通道的某些部分是扩张的。由翘曲引起的扩张带的几何形状, 如扩张折射或扩张位置 (通过岩性或构造形式来确定) 可用来解释和预测矿区范围的矿体排列。

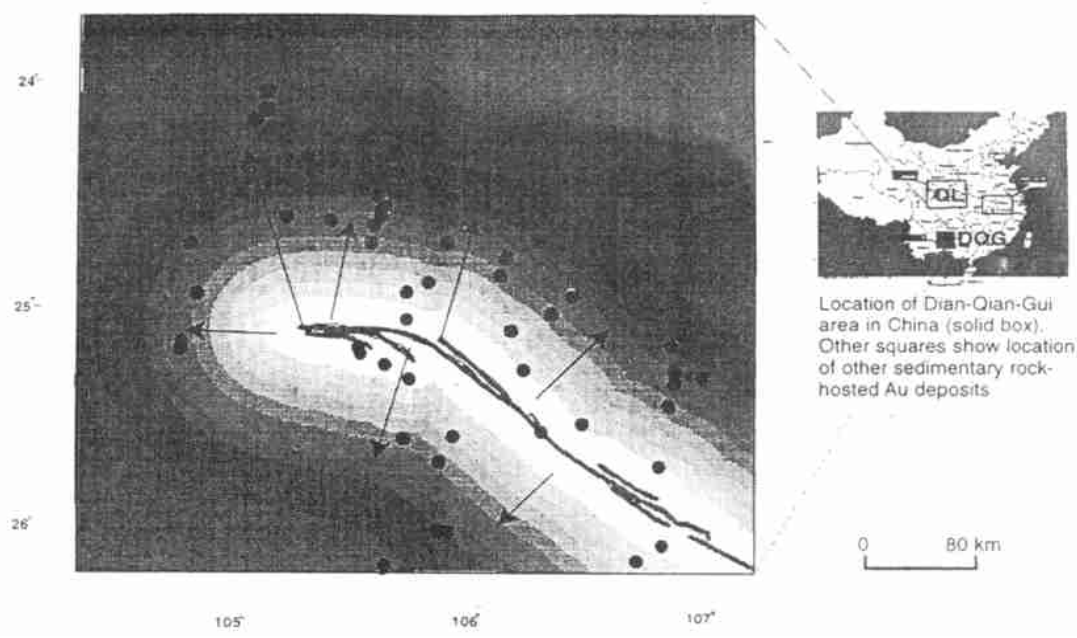


图 11 中国滇黔桂地区沉积岩金矿床的区域地质和构造控制

Fig. 11 Regional geological and structural control of sedimentary rock-hosted Au deposits (circles) in the Dian-Qian-Gui area, P. R. China

右江断裂带周围 100 km 宽的波及带。其中的沉积岩金矿床数量最多, 而且分布的形状与波及带非常相似, 表明这些矿床可能与右江断裂带有关。该地区的成矿理论可能是: 流体是沿右江断裂带中 NE 向的断裂喷射出来的, 然后由区域规模的断裂导流到构造隆起附近各个矿床的位置, 与 CVIL 附近流体的流动相似(据 Leonard 等, 2001)

6 造山带的沉积岩金矿床

一些沉积岩金矿床及其所在构造之间的密切关系表明, 它们是成因上互相有联系的矿床。构造和热液事件来源于相似的构造机制, 经历了相同的演化过程。金矿产于多期次活动断裂中的可能性比产在单期活动断裂中的可能性大(罗孝桓, 1994)。

Peters (1998, 2000) 指出, 先存的区域褶皱的剪切褶皱作用是卡林矿带的 Betze 大型矿床的一个主要控矿因素, 并且部分变形是与矿石沉淀同时进行的。已有文献记载中国贵州烂泥沟金矿床也是同变形成因的金矿床(罗孝桓, 1993, 1996; Li Z P 和 Peters, 1998), 秦岭褶皱带的金龙山和马鞍桥金矿床的矿石结构也表明它们是同变形金矿床(Peters, 2000a)。在滇黔桂地区的烂泥沟及其他金矿床中, 构造运动和变形不仅是影响沉积岩金矿床形成的物理作用, 也是直接或间接地影响其形成的化学作用(图 12)(Peters, 2000)。根据 Chen Y. M (1987) 的资料, 这些作用还能改变矿体, 引起金属的富集或贫化, 能将分散在矿源层中与矿有关的化学元素集中到矿床

中去。根据推测, 这些矿床中的区域性构造和热液事件提供了热源和成矿环境, 其中的局部断层形成了矿体的圈闭和储矿空间(罗孝桓, 1993, 1994, 1996)(图 11)。

在内华达北部的 Betze 金矿床中, 矿体由具不同的地质、矿物与结构特征的高品位富矿体组成(Peters, 1996; Peters 等, 1978)。矿体具有许多构造控制的卡林型矿床的特征, 产于薄层的、不纯碳酸盐岩或灰质粉砂岩、角砾岩体和侵入岩或钙硅酸盐岩里。Betze 矿体中许多矿石经历了高度的剪切及角砾岩化作用并显示出同变形的热液沉淀的证据(图 13, 图 14)。一些岩石类型和前构造、同构造事件的相互作用可以解释众多富矿体的分布与分带的原因。热液蚀变的规模不等, 有大面积、透入性的蚀变形式, 也有与富矿体有关的小范围的蚀变形式。蚀变作用包括碳酸岩的脱碳酸盐(脱钙)化、泥化(伊利石-粘土)与硅化。矿体及其周围的蚀变形式圈定了一个大的、多孔隙的扩容和便于流体高度流动的岩石范围。狭窄的伊利石和富粘土的断层泥局限在未蚀变的大理岩或钙质硅酸岩扁豆体周围, 表明流体趋向于在渗透性的构造和变形带中流动。

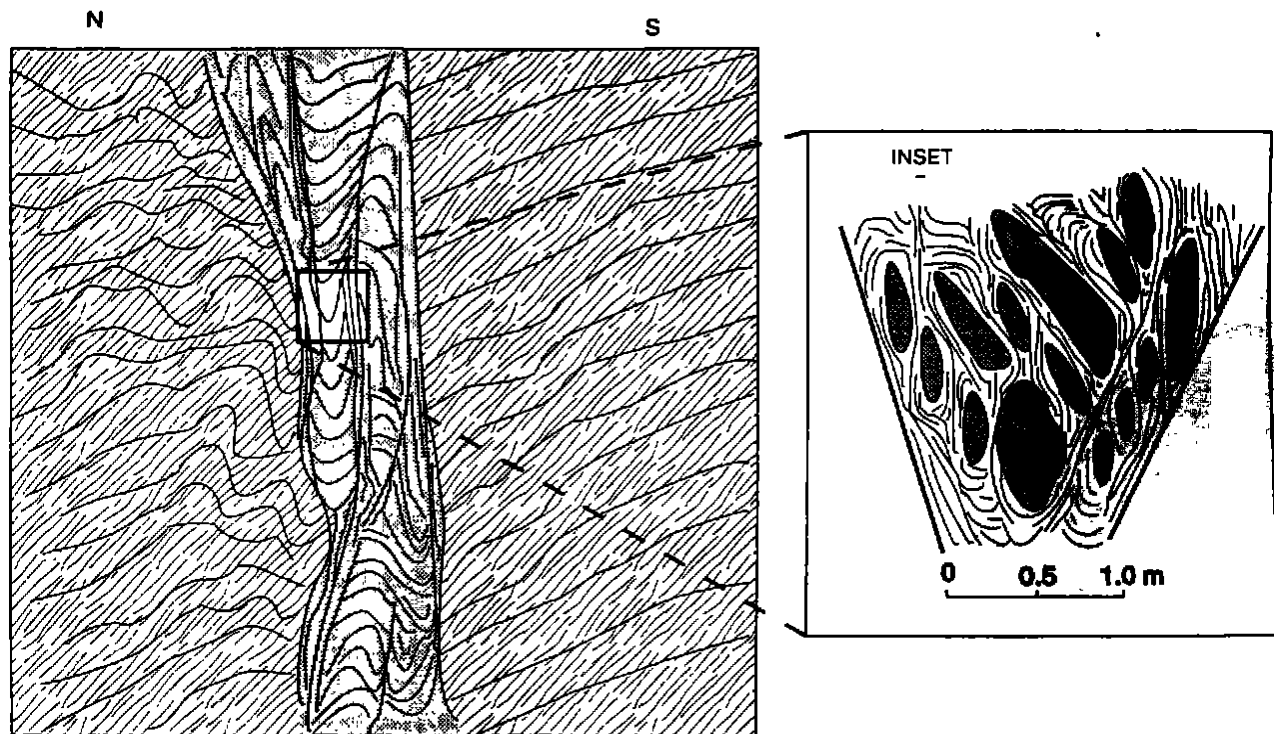


图 12 中国贵州省烂泥沟金矿床沿主 1 号剪切带(F3 断裂)发育的扁豆体构造示意图

Fig. 12 Schematic sketches of phacoid development along vein No. 1

剪切带宽达 100 m, 内含扭曲、变形、变窄及褶皱的层理。褶皱带之外(北部)的层理受到了干扰。在剪切带内部岩石支离破碎, 局部扁豆体四周包围有粘土质的断层泥(据 Peters 等, 2001a)

比较而言, 中国秦岭褶皱带金龙山沉积岩金矿区(镇安县)的构造是巨型直立的背斜、中型的平卧褶皱及断层。矿体主要受 EW 向的背斜控制, 通常产在走向 E 的含有角砾、断层泥和裂隙网脉的脆-韧性剪切带中, 也有产于褶皱的轴或翼部者。金品位在强压性的韧性变形带的交切处最高, 沿 NE 向断裂的某些部位也比较高。一种透入性劈理(S_1)穿切大部分岩石(图 15)。剪切带以外的矿体的微构造-结构表明劈理晚于沿层理分布的微层状硫化物的形成, 这与同生、层状的金的沉淀早于脆-韧性剪切作用的想法是一致的(图 16)。热液蚀变类型包括硅化、方解石细脉和交代作用, 具有少量的浸染及细脉状的黄铁矿、毒砂、重晶石和高岭石, 另外局部还有地开石及萤石出现。金矿化与二氧化硅、黄铁矿的关系密切。表生带中含有大量的褐铁矿(Peters, 2000b)。

中国金龙山金矿床的矿石矿物是黄铁矿、砷黄铁矿、毒砂、辉锑矿、闪锌矿和黄铜矿, 主要脉石矿物为石英、重晶石、方解石、绢云母、重晶石和粘土矿物。含金黄铁矿呈自形—半自形, 沿层理面和溶解交代带发育, 其常具有一个富砷黄铁矿的环边结构(图 17)。这种矿石具有块状、条带状、角砾状、细脉-浸染

状特征, 发育在中等的网状构造里。这些构造与层状、原生的同生沉淀矿石的特点一致, 但也与后生的并叠加有造山作用的矿石一致。沿这些细脉出现有富砷及贫砷黄铁矿的分带表明, 砷(可能还有金)的沉淀受微压力的控制, 因为富砷带位于剪切部位, 而贫砷带产于张性裂隙中(图 17D)。这些事件的时间不甚确切。显微交切关系表明早期的层控矿化层经历了后期脆-韧性变形的改造, 但没有受到早期形成劈理事件的影响。成金后的石英脉事件形成了一系列的造山期的脉和细脉, 以及板状石英基质角砾透镜体, 在局部地方与锑的加入同时(Peters, 2001b)。

中国秦岭褶皱带的马鞍桥金矿床也具有同变形造山成因特征(Peters 等, 2000b), 矿床产于晚泥盆—晚白垩系的细粒碎屑岩、碳质板岩和灰岩层位中。其上部层位与早中生代的花岗岩接触(图 18)。接触变质作用使局部的灰岩变成了大理岩。层理面已局部地被后侵入的强剪切带破坏, 沿千枚岩和石英-绢云母剪切带出现许多大理岩透镜体。这种层控的、产于剪切带中的金矿带被剪切带周边未变形地层中的硫化物矿物浸染晕所环绕。一般, 浸染晕比剪切带厚,

但金品位比剪切带低。蚀变由沿一系列剪切带产生的强糜棱状石英-绢云母-黄铁矿组成, 伴生有黑云母、斜长石、铁白云石、白云石、磷灰石和方解石, 这些矿物在剪切带靠近强剪切部位呈浸染状、非结构破坏性生长(图 19)。矿石矿物主要由磁黄铁矿、黄铁矿组成, 还有少量的磁铁矿、毒砂、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、自然金, 局部有辉锑矿, 以及 Ni-Sb, Pb-Cu-Zn, Pb-Sb 的硫化物。金主要以自然金颗粒产于金属与非金属矿物的边界处, 局部也产在沿串状剪切带产生的蚀变基质中。马鞍桥金矿矿石的地球化学特征是砷、锑含量高, 与其他卡林型沉积岩金矿床相似。其他含量高的元素, 如铜、铅、锌、镍和钴也与卡林型矿床相似, 但也与一些造山带的石英脉矿床相似。在马鞍桥金矿床中的局部部位, 铋和银的含量比其他秦岭褶皱带卡林型矿床高, 可能反映距北边侵入的中生代花岗岩较近, 且受其影响, 金矿区位于接触带的范围之内。马鞍桥金矿床与造山剪切带石英脉金矿床有许多相似之处, 如自然金的存在、石英-绢云母蚀变、沿剪切带局部形成石英脉。另外一些特征, 如围岩、地球化学和地质环境也与卡林型矿床相似。马鞍桥及其西边的、与之相似的八卦庙金矿床的成因极可能与赋矿剪切带的作用有关(Peters 等, 2000b)。

7 同变形矿体的形成阶段

产在扩张和高流量流体带中的同变形造山带的沉积岩金矿体所含有的内部成分, 如石英、断层泥及热液蚀变矿物可以指示其形成的复杂历史。这种矿体的形成主要有 4 个阶段: (1) 成矿基本条件及矿体核心部位的确定; (2) 叠加和再贯入; (3) 断裂活动; (4) 固化, 如 Peters(1993b) 所述矿床中的脉。矿化作用可以贯穿 4 个阶段, 也可只局限于一个阶段。复杂的矿体显示有多期成矿作用, 形成较大的矿床, 因此增加了形成高的金属含量的可能性。

(1) 早期成矿条件和矿体核心部位的确定阶段。

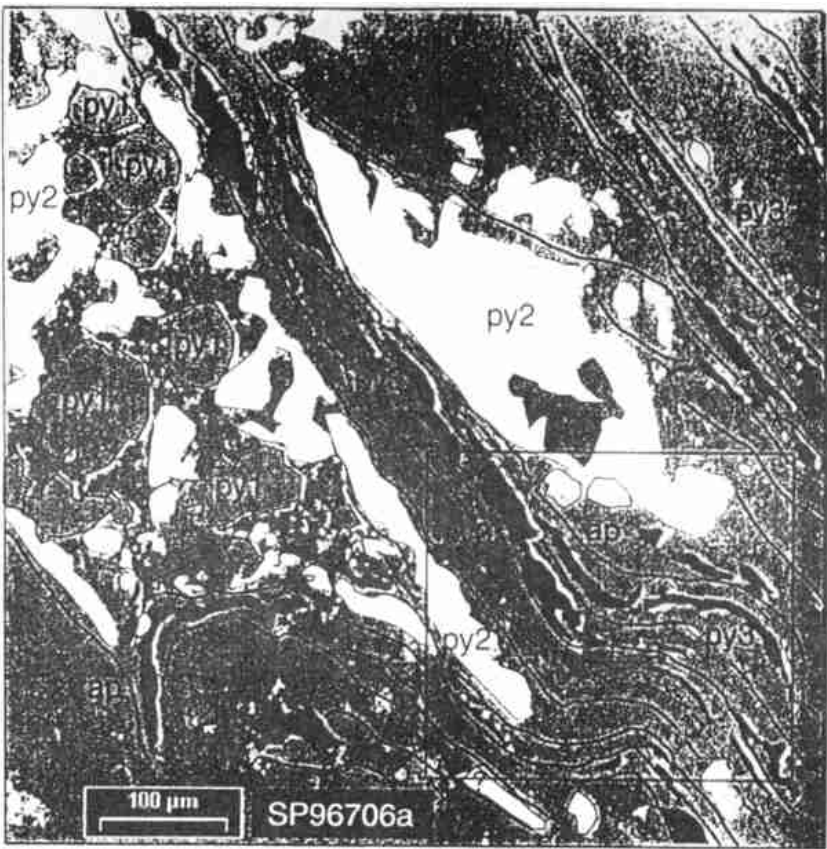


图 13 Goldstrike 金山 Betze 矿床煌斑岩脉微型剪切带中多世代的富砷(含金?)黄铁矿

Fig. 13 Multiple generations of As-rich (Au-bearing?) pyrite in micro shears in lamprophyre dyke in Betze deposit, Goldstrike mine 剪切片状黄铁矿(Py2) 叠加在自形的黄铁矿(Py1) 之上, 混有石英、绢云母细粒的剪切带状黄铁矿(Py3) 叠加在前两种黄铁矿上。还可以见到热液成因的磷灰石(ap)。

包括较高流体压力条件下的热液蚀变和溶解。流体从通道的中心部分向外扩散, 然后聚集在早期的薄弱带, 如先存的千糜岩、岩墙、劈理或火成岩枝所在的部位。流体压力在释放流体的转弯处(Sibson, 1990)或在所在通道中的扩张突出部位降低, 因此流体压力的变化是断裂作用的结果而不是触发断裂的原因。

(2) 叠加和再贯入阶段。包括围岩同化与以通道化学条件明显改变为特征的矿脉带的形成。在该阶段脉石、矿石矿物开始沉淀、堵塞扩容带中的流体通道, 导致早期压力的聚集, 促使断层沿滑动面运动。

(3) 断裂活动阶段。以早期形成的脉带里的主要断裂活动为特征。这造成早期阶段内部组分机械变形。沿断裂发生的位移量不尽相同, 在靠近断裂的部位会出现断裂位移量增大的趋势, 这样就会形成断层泥、脉石和矿化岩石角砾互层的混杂。在裂隙、席状带, 特别是矿体的周围发育有微细的次级细脉。

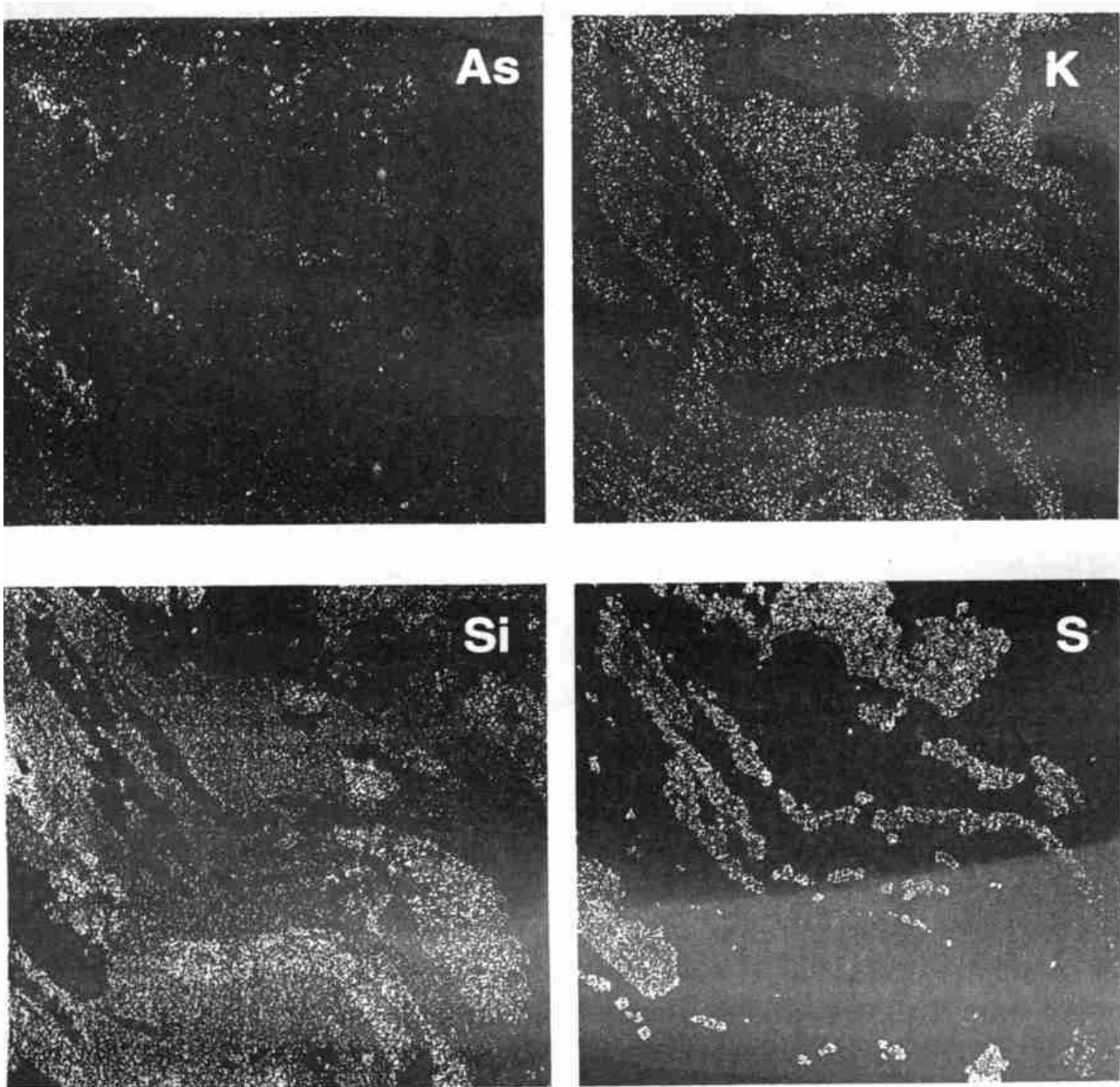


图 14 图 13 中插图的扫描电镜 X-射线密度, 显示 Betze 矿床煌斑岩脉中微型同变形剪切带的组分

Fig. 14 X-ray intensity SEM maps of inset shown in Figure 13.

As 图像显示砷在黄铁矿(Py2)中的富集, 但砷也产在黄铁矿的两个矿物相 Py1 和 Py3 中(见图 12)。K 图像表示混有石英(Si)、沿剪切面分布的热液绢云母。S 图像显示的是 Py1, Py 2 和 Py3 三种黄铁矿的分布。这些图像及多期角砾构造表明主要的金沉淀事件是同变形期的。

(4) 固化阶段。包括几个带的形成, 他们可以在通道中、或沿通道连接起来形成更大的、复杂的成熟矿体。围岩和原有的矿化物质的拉长、旋转、角砾岩化和断层泥的发育是该阶段的特征, 而且可以形成矿体的复杂形态。

8 讨论及结论

中国和内华达北部沉积岩金矿床的成因可能包

括几种机制: (1) 单一的均质成矿流体沿线性构造运移, 在作为渗透圈闭构造窗中形成矿体群; (2) 构造线性体与矿区走向、构造窗的交切部位可为深部成矿流体提供渗透集中部位; (3) 构造作用、地壳级的水文流及热流为各个矿区提供了不同时期独特的成矿背景。

大矿体的控制因素是复杂的, 通常出现几种原因的扩张作用。同一矿体的不同部位可能以不同方向的构造控制为主, 这些构造可能是互相关联的、并被认为随着矿体发育时间的推移而变化, 从早期广

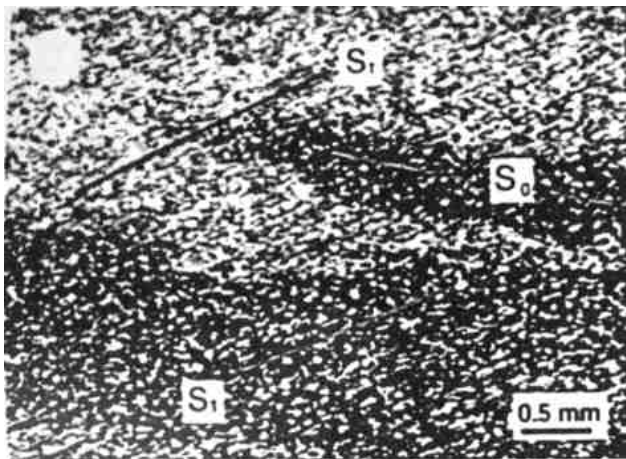


图 15 中国东秦岭褶皱带陕西镇安金龙山金矿矿石的显微照片

Fig. 15 Microphotographs of relations among Au-pyrite mineralization, bedding and cleavage, Jinlongshan (Zhen'an) Au mine, shaanxi province, East Qinling fold belt, china

照片显示含金黄铁矿化、层理和劈理之间的关系。这些组构关系表明劈理晚于金的沉淀,是沿层理发育的(据 Peters 等, 2001b)

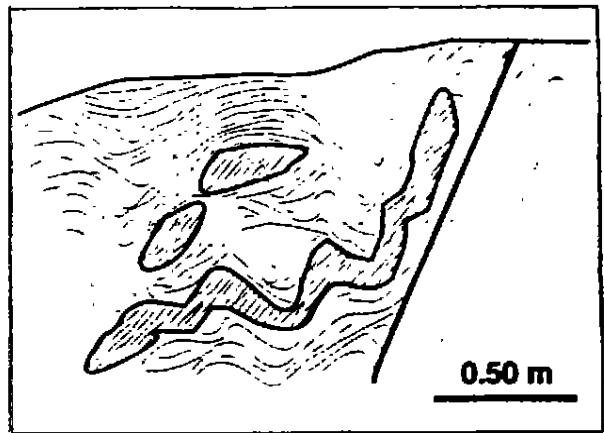


图 16 中国东秦岭褶皱带陕西丁马金矿带镇安金龙山金矿内中等规模的变形结构

Fig. 16 Mesoscopic deformation textures in the Zhen'an (Jinlongshan) Au mine area, Dingma Au belt, shaanxi province, East Qinling fold belt, China

典型的矿体附近的混杂结构(示意图)。较黑的地方是破碎砂岩的扁豆状透镜体,周围是泥质基质。

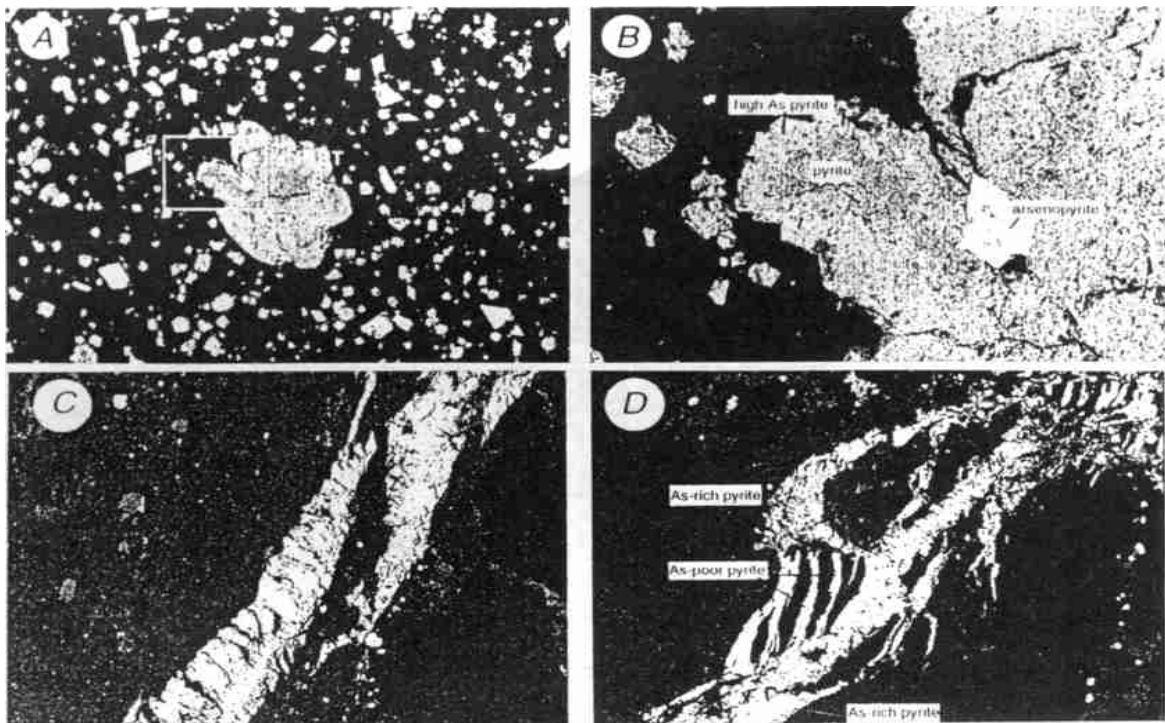


图 17 中国东秦岭褶皱带陕西丁马金矿带镇安金龙山金矿床富砷黄铁矿矿石的扫描电镜后散射图像

Fig. 17 SEM backscatter of As-rich pyrite ores, Jinlongshan (Zhen'an) Au deposit, Dingma gold belt, East Qiling fold belt, Shaanxi province China

(A) 黄铁矿、砷黄铁矿。图像的中央部位有一个 150 μm 大小的黄铁矿,核部的砷含量较低,呈突出状生长的环带中砷含量较高。闪亮的自形晶矿物为砷黄铁矿。(B) 150 μm(直径)的环带状黄铁矿的一部分。贫砷的内部环带,向外成为富砷。(C) 韧性成因的局部富砷黄铁矿脉。(D) 贯入到韧-脆性剪切带中的富砷黄铁矿细脉。张性细脉,贫砷,也是富砷黄铁矿脉事件的产物,表明毫米范围内的压力梯度可能对黄铁矿矿物(相)及金铁地球化学与沉淀产生了影响(据 Peters 等, 2001b)

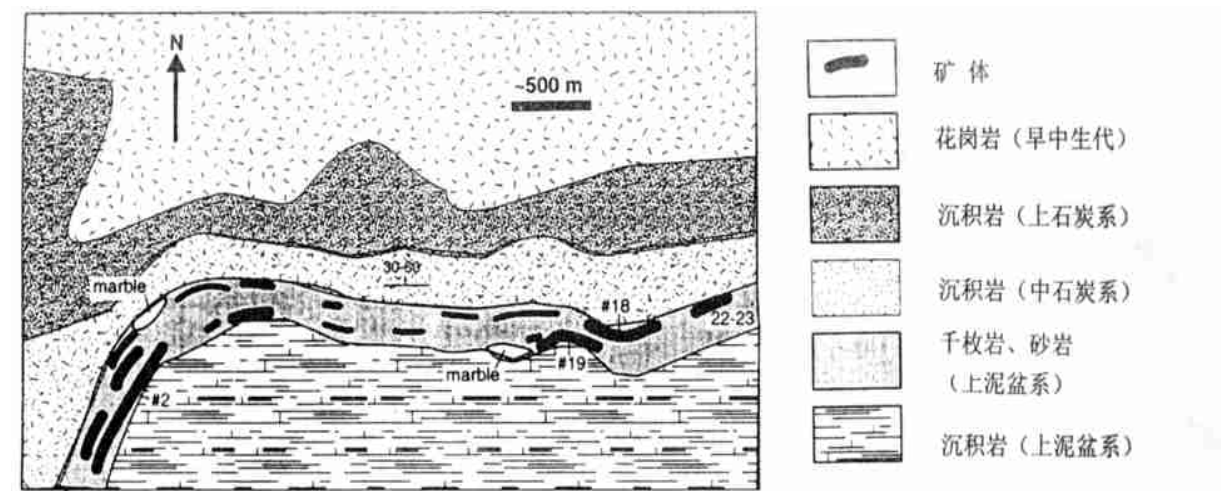


图 18 中国东秦岭褶皱带陕西造山带型马鞍桥金矿体的平面地质草图

Fig. 18 Plain geological sketch of the orogenic Ma'anqiao Au orebodies, Shaanxi province, East Qinling fold belt, China

糜棱岩化的上泥盆系千枚岩和砂岩中矿石透镜体的层控特征。可以看到沿千枚状围岩形成的破碎大理岩透镜体。从地球化学上看, 马鞍桥金矿与许多卡林型矿床相似, 但产有自然金。

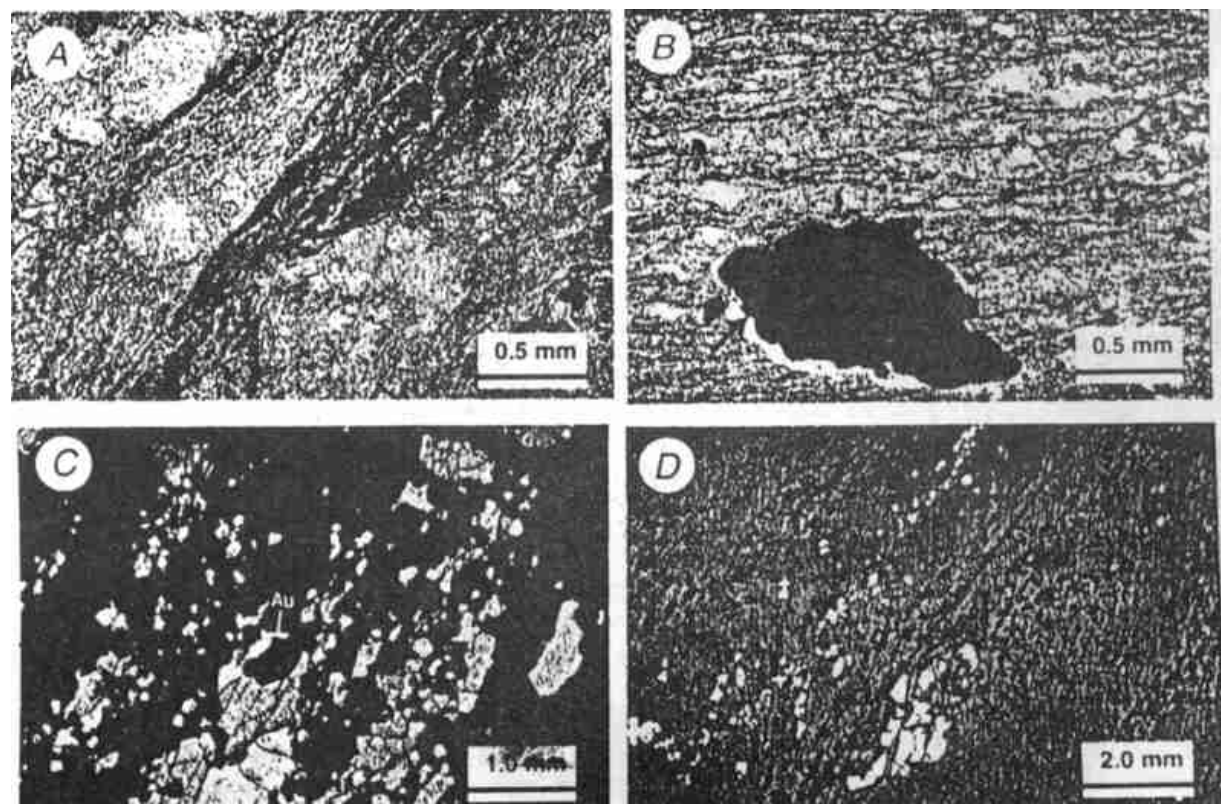


图 19 中国东秦岭褶皱带陕西马鞍桥金矿中硫化物矿化、金与糜棱岩页理关系的显微照片

Fig. 19 Microphotographs of examples of relation of sulfide minerals and Au to mylonitic foliation in the Ma'anqiao Au Mine, Shaanxi province, East Qinling fold belt, China

(A) 沿富绢云母页理拉长的硫化物矿物, 正交偏光。(B) 变斑晶硫化物颗粒, 左边为波状消光, 正交偏光。(C) 大块的黄铁矿及砷黄铁矿, 其中的金沿页理产生, 反射光。(D) 硫化物颗粒呈变斑晶沿页理面拉长并集中产出

泛的扩张发展到断裂运动和石英沉淀, 然后发展成更加复杂的互联的通道网脉。大范围中矿体的特征可以从内部组分的岩石和结构关系显示出来, 小范围矿体的特征可由一个矿区矿体之间的几何关系显

示出来。系统的文献、几何学和矿体组分结构的分析可形成成矿过程的概念化或经验关系,并可用于矿区评价和找矿。

致谢: 在 Betze 金矿床的调查得到巴利克公司 Goldstrike 金矿的帮助,对卡林矿带其他矿床的调查得到纽蒙特矿业有限公司的协助;中国黄金局和天津地质研究院为在中国金矿床的考察提供了方便; Ted G. Theodore 审阅并修改了初稿。

(李永明译,黄佳展校)

参考文献:

[1] Arehart G B. Characteristics and origin of sediment-hosted gold deposits a review[J]. *Ore Geology Reviews*, 1996, 11: 383-403.

[2] Bakken B M, Hochella M R Jr, Marshall A F, *et al.* High resolution microscopy of gold in unoxidized ore from the Carlin mine, Nevada[J]. *Economic Geology*, 1989, 84: 171-179.

[3] Bateman A M. *Economic Mineral Deposits*[M]. New York: John wiley and Sons, 1942. 898.

[4] Chen Yuanming. The discovery of the fine-grained disseminated gold deposit in southwestern Guizhou by means of geochemical methods (in Chinese)[J]. *Contribution to the Exploration of Geophysics and Geochemistry*, 1987, 5: 39-44.

[5] Conolly D E. A contour method of revealing some ore structures[J]. *Economic Geology* 1936, (3): 259-271.

[6] Cox S F, Etheridge M A, wall V J. The role of fluids in syntectonic mass transport, and the localization of metamorphic vein-type ore deposits [J]. *Ore Geology Reviews*, 1986, 2: 65-86.

[7] Etheridge M A, Wall V J, Vernon R H. The role of the fluid phases during regional metamorphism and deformation [J] *Journal Metamorphic Geology*, 1983, 1, 205-226.

[8] Fyfe W S, Price W J, Thompson A B. *Fluids in the Earth's Crust*[M]. New York: Elsevier, 1987. 383.

[9] Hofstra A H, Leventhal J S, Northrop H R, *et al.* Genesis of sediment-hosted disseminated-gold deposits processes documented in the Jerritt Canyon district, Nevada [J]. *Geology*, 1991, 19, 36-49.

[10] Kerrich Robert. *Fluid transports in lineaments*[M]. London: Philosophical Transport Royal Society, 1986. A 317, 216-251.

[11] Krzvarit Milos, Bohmer Miloslav, *Prospecting and exploration of mineral deposits*[M]. Prague: Academia, 1987. 431.

[12] Li Zhiping, peters S G. Comparative Geology and Geochemistry of Sedimentary Rock-hosted (Carlin-type) Gold deposits in the People's Republic of China and in Nevada, USA [R]. USGS Open-File Report, 2000. 98-466(CD-Rom 1.1 with data base).

[13] Luo Xiaohuan. Exploration of the mechanisms and features of ore-control fault (F3) and structure metallogenic processes at the Lannigou gold deposit[J]. *Guizhou Geology*, 1993, (1): 26-40(in Chinese).

[14] Luo xialhuan. Geological characteristics, forming mechanism and prospect on Lannigou gold deposit in Zhengfeng county, Guizhou Province [A]. In: Liu Dongsheng, Tan Yunjin, Wang Janye *et al.* *Chinese Carlin-type Gold Deposits* [C]. Nanjing: University of Nanjing Press, 1994. 100-115 (in Chinese).

[15] Luo Xiaohuan. A study on the control of geometric and kinetic features of faults structures on the location of gold deposits example from Carlin-type gold deposits of southwest Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 1996, 14: 46-54(in Chinese).

[16] Peters S G. Lode control of the Characers Towers goldfield, northeastern Queensland [J] *Australasian Institute Mining Metallurgy Proceedings*, 1990, (2): 51-60.

[17] Peters S G. Lode control of the Hodgkinson goldfield, northeastern Queensland [J]. *Australasian Institute Mining Metallurgy Prwceedings*, 1991, (2): 25-36.

[18] Peters S G. Formation of oreshoots in mesothermal gold-quartz vein deposits. in: Hapnes S j. *Vein-type ore deposits*, Special Vol.[J]. *Ore Geology Reiews*, 1993, 8: 277-301.

[19] Peters S G. Normendature, concepts and classification of oreshoots in vein deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 1993, 8: 3-22.

[20] Peters S G, Leonardson R W, Ferdock G C. Breccia types in the Betze orebody, Goldstrike Mine, Eureka County, Nevada [A]. In: Vikre Peter, Thompson T B, Bettles K, *et al.* *Carlin-type Gold Deposits Field conference* [C]. Society Economic Geology Guidebook Series, 1997, 28: 87-100.

[21] Sibson R H. Fault rocks and fault mechanisms[J]. *Journal Geology Society London*, 1977, 133: 191-213.

[22] Sibson R H. Fault and fluid flow[A]. In Nesbitt B E. *fluids in Tectonically Acive Regimes of the Continental Crust* [C]. Mineralogical Association Canada, Short Course, No. 18, 1990. 93-109.

[23] Storrar C D. *South African Mine Valuation*[M]. Chamber of Mines of South Africa, Johannesburg, 1981. 470.

[24] Sverjensky D A. Oil field brines as ore-forming solutions[J]. *Economic Geology*, 1984, 79: 38-49.

[25] Woitsekhowskaya M, peters S G. Geochemical modeling of alteration and gold deposition in the Betze deposit[A]. In Tosdal, R. M. *Contribution to be Gold Mitallogeny of Northern Nevada* [C]. U S. Geological Survey Open-File Report 98-338, 1998. 211-222.

[26] Peters S G, Ferdock G C, Woitsekhowskaya M B, 等. 美国内华达 Gold strike 矿区卡林型贝茨金矿同变形的富矿分带[J]. *地质找矿论丛*, 2000, 15: 1-16, 115-132.

[27] Peters S G. 内华达北中部新月谷—独立金矿区线性构造带的证据[J]. *地质找矿论丛*, 2000, 15(3): 204-215.

USE OF STRUCTURAL GEOLOGY IN EXPLORATION ORE AND MINING OF SEDIMENTARY ROCK-HOSTED AU DEPOSITS

Stephen G. Peters

(United states Geological Survey, Reno, Nevada, U.S.A)

Abstract: Structural geology is an important tool in regional, district and orebody-scale exploration and development of sedimentary rock-hosted Au deposits. Identification of the timing of important structural events in an ore district allows modeling of genetic models of ore formation. The most practical uses of structural geology deal with measurement and definition of the various elements that comprise orebodies, which can then be directly applied to ore reserve estimation, ground control, grade control, safety, and mine planing. District and regional-scale structural studies are directly applicable to long-term strategic planing, economic analyses and land-ownership issues.

Orebodies in sedimentary rock-hosted Au deposits are discrete hypogene and epigenetic masses usually hosted in a fault zone, breccia mass, or lithologic bed or unit. These attributes allow structural geology to be directly applied to the mining and exploration of sedimentary rock-hosted Au deposits. Internal constituents of the ore bodies usually reflect unique episodes relating to ore formation. The main internal constituents in orebodies are ore minerals, gangue, and alteration that usually are mixed with one another in complex patterns, the relations among which may be used to interpret the processes of orebody formation and control.

Controls of orebody location and shape are usually due to dilatant zones caused by changes in orientation attitude, splays, lithologic contacts, and intersection. In addition, conceptual parameters such as district fabric, predictable distances and stacking also are used to understand the geometry of orebodies. Control in ore districts and the location and geometry of orebodies within ore districts can be predicted to various degrees by using a number of qualitative concepts such as internal and external orebody plunges, district plunge, district stacking, conduit classification, geochemical geobarometric, and geothermal gradients and warps. These concepts have practical and empirical application in most mining districts where they are of use in the exploration for ore, but are of such broad and general application that they may not represent known or inferred ore formation processes.

Key words: sedimentary rock-hosted Au deposits; structural geology; exploration; mining; Nevada, U. S. A; China