

文章编号: 1001-1412(2000) 01-0001-16

美国内华达 Goldstrike 矿区 卡林型贝茨金矿同变形的富矿分带

Stephen G. Peters¹, Gregory C. Ferdock²,
Maria B. Woitsekhowskaya¹, Robert Leonardson³, Jerry Rahn³

(1. 美国地质调查所 里诺分部, 内华达大学 马凯矿业学院, 美国 内华达 里诺 89557-0047;

2. 美国内华达大学马凯矿业学院 地质科学系, 美国 内华达 里诺 89557-0047;

3. 巴利克 Goldstrike 矿业有限公司 矿山地质部, 美国 内华达 埃尔科 89803)

摘要: 贝茨金矿是卡林金矿带最大的卡林型矿床, 由多个高品位富矿体组成。金矿体产于不纯的碳酸盐岩角砾岩和侵入体中, 明显受构造控制, 矿体显示出同变形热液沉淀特征。在 NW W 向的 DDZ 剪切褶皱构造带中, 贝茨金矿的富矿构成空间上的分带形式, 主要的富矿类型有含金红石的硅质富矿, 伊利石-粘土-黄铁矿富矿, 含雄黄、雌黄的富矿, 含辉锑矿的硅质富矿和多金属富矿。研究表明, 成矿溶液为弱-中等盐度, 在构造活动期上升并冷却。变形时水-岩反应条件和压力-温度的变化可能引起流体的变化, 并导致含金流体与围岩的动态反应时间不同而形成富矿分带。富含 As, Sb, Hg 的金矿石类型是同一成矿系统中的不同部分, 该系统与侏罗纪后的脆-韧性变形同时形成。

关键词: 卡林型金矿; 同变形; 富矿分带; 内华达; 美国

中图分类号: P618.50

文献标识码: A

内华达州卡林金矿带上共有 50 多个金矿床, 贝茨金矿是其中之一。据保守估计, 该矿带的黄金储量为 3 200 t (Christen 1996; Jackson 1997)。贝茨地区的金矿勘探始于 1962 年, 1974 ~ 1986 年期间开采硅质围岩中矿体的氧化矿, 1987 年巴利克矿业公司和纽芒特矿业公司发现了深部的贝茨矿体和波斯特矿体并开始生产, 截止 1998 年, 共生产了大约 325 t 黄金。贝茨金矿深部矿体金的总储量超过 1 000 t, $w(\text{Au})$ 平均品位为 6.4×10^{-6} 。Goldstrike 矿山每天采掘量为 300 000 t ~ 500 000 t, 其中矿石量为 30 000 ~ 60 000 t。

卡林型金矿床的特征是品位较低而相对稳定 (Arehart 1996)。但是, 贝茨金矿及卡林矿带其他金矿深部露采的情况表明, 一些矿体由在空间上呈复杂分带的截然不同的富矿组成 (Peters 1996, 1997a)。Christensen (1993) 发现卡林矿带上有层控、构造控制的复杂矿体。贝茨金矿受构造控制, 其富矿体中有显微—中等尺度的变形组构和结构。这些富矿体的几何形态及

收稿日期: 1999-09-30;

第一作者简介: 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, 发表论 60 余篇。

构造特征表明矿体的某些部分与变形同时形成,与褶皱、断层有空间上和成因上的联系。

贝茨金矿的每一类富矿体都有其特殊的岩石类型、矿石-蚀变矿物组合和构造组构的组合。富矿体通常是岩石扩容、大量流体活动及岩石化学成分特殊的显示标志。这些富矿体比周围的矿化岩石含有更高的金属量。大多数中温和低温热液脉状矿床的含金富矿体在 $2 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$ t 之间, $w(\text{Au})$ 品位一般 $> 3.1 \times 10^{-6}$ (Peters 1993b)。这些富矿体的品位大都不均一,中间或向一侧凸出的部位厚度大且品位较高,金矿体很少有突然尖灭者,一般都是在其边部厚度逐渐变薄,过渡到边界品位。

1 区域地质

内华达北部卡林矿带地区的早、中古生代深水硅质沉积岩和火山岩在晚泥盆世和早密西西比 Antler 造山运动期间向东逆冲了大约 75 ~ 200 km (Robert 等 1958)。逆冲岩石由 5 km 厚的罗伯茨山异地岩组成,置于同时代浅水沉积的、含有大量碳酸盐岩的陆台岩系之上 (图 1、2,表 1)。罗伯茨山逆冲断层将上、下盘岩石断开。在二叠纪末—早三叠世时,由泥盆系最上部地层到上二叠统下部富含碳酸盐岩的浊积砂岩及盆地地层组成的高尔康达 (Golconda) 异地岩被逆冲到大陆边缘的顶部及部分罗伯茨山异地岩之上。这些构造事件表明地壳的增厚伴随有变形作用。区域变形事件从 D_0 — D_4 列于表 1。卡林矿带上金矿化发生在晚白垩世或早始新世 (Arehart 等 1993, Teal 和 Jackson 1997), 可能与晚侏罗世到早始新世的 Sevier-Laramide D_3 构造事件同时。一条与新月谷 (Crescent Valley) 无关的 NE 向线性构造切穿卡林矿带。与卡林矿带金矿化同时 (晚古生代—中生代), 沿该线性构造地质活动不断发生 (图 2)。

内华达北部沉积岩中的浸染状金矿床在空间上与罗伯茨山异地岩中的构造窗有关,或与异地岩之下的构造高地有关 (Roberts 1960, 1996; Thorman 和 Christensen 1991; Peters 1997b, c)。卡林矿带是一个靠近这些构造窗的

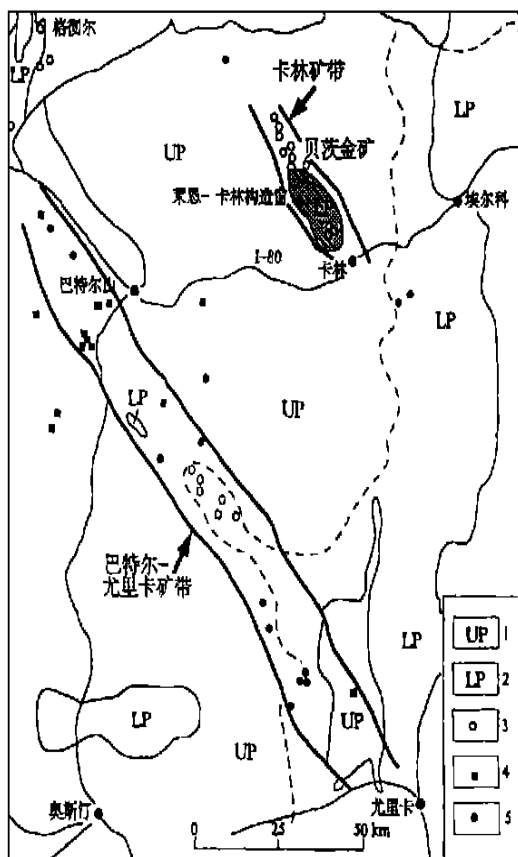


图 1 内华达中北部金矿床异地岩和构造窗分布略图

Fig. 1 Gold deposits and simplified hypothetical distribution of allochthons and tectonic windows in north-central Nevada.

1. 上盘岩石: 罗伯茨异地岩 (奥陶-泥盆系), Golconda 异地岩 (泥盆-二叠系) 2. 下盘岩石: 冒地槽岩 (下古生界) 和构造窗 3. 卡林型金矿床 4. 与深成岩有关的金矿床 5. 其他类型金矿床

NW 向金矿带(图 1)。卡林矿带内最大的构造窗是向 NW 倾状的莱恩—卡林(Lynn-Carlin)构造窗。其中产有贝茨金矿床及其北部与之有关的金矿床(图 1, 2, 3A, 3B)。构造窗南部出露的下盘岩石为奥陶和寒武系(?)的厚层白云岩(图 3C, D), 上覆奥陶系黑色—深灰色, 细粒块状、含有生物碎屑和燧石的厚层白云岩。

表 1 内华达北部卡林矿带的构造事件简表

Table 1 Generalized and combined tectonic events, Carlin trend area, northern Nevada.					
变形事件	造山事件	时间间隔	构造活动	矿化	参考文献
D ₀	深积	早中古生代	火山作用, 软沉积物变形	沉积喷气矿床	略
D ₁	Antler-Humboldt	晚泥盆-早二叠纪	罗伯茨山逆冲断层, 紧闭的 F ₁ 褶皱, 后期的火山和沉积, CVIL	?	略
D ₂	Sonoma-Elko	晚二叠-晚侏罗世	Golconda 逆冲作用, 大量穿透性的缓倾伏 NE 和 F ₂ , NW 走向的褶皱, CVIL	?	略
D ₃	Sevier-Laramide	中白垩-早始新世	NWW 走向的 F ₃ , 剪切带, 再次褶皱, 深成岩, CVIL	矽卡岩和深成中温热液矿脉 贝茨矿床	略
D ₄	盆-脊拉张作用	中始新-早渐新世	脆性盆地, 山脉断层, 火山深成作用, CVIL	热泉矿床	略

注: CVIL: 指与 Crescent Valley 无关的线性体。

金矿床主要产于下盘岩石上部的二个地层层位中: ①志留和泥盆系罗伯茨山组粉砂质层纹状白云质灰岩; ②泥盆系的无名灰岩, 局部称为 Popovich 灰岩, 由板状、层纹状的粉砂白云质、泥晶质灰岩组成; ③局部被定为泥盆系的 Rodeo Creek 层, 由层纹状泥岩、粉砂岩、硅质碎屑岩和燧石质岩石组成, 局部有灰岩。虽然这三层岩石中都产有金矿, 但 90% 以上的金矿床产于 Popovich 灰岩顶、底板之间 350 m 范围内(图 3C, D)。上盘岩石局部矿化, 包括通常称为奥陶系 Vinini 组的硅质岩, 也包括志留系和泥盆系的岩石。

卡林矿带的金矿化集中在一系列 NNW-NE 向的中等角度到高角度的矿区规模的剪切带和断层沿线(图 2, 3B, 4)。此外, 发现了几条 NWW 走向、NE 倾伏的剪切褶皱(Peters 1997a, b, c)。在卡林矿带附近, 通常呈缓倾伏的 F₂ 褶皱轴的走向, 在上盘及下盘岩石中都可分成两区段。第一区段有一系列 NE-SW 向的褶皱轴。第二区段为 NNW-SSE 的褶皱轴(图 4A)。第一区段通常分布于卡林矿带外的上盘岩石中。第二区段大致与下盘的构造窗一致, 但也含有上盘岩石, 褶皱轴向为 NNW-SSE。Peters(1996, 1997c) 解释这种几何关系为剪切褶皱作用所致, 那里 NWW-SEE 向晚侏罗世-早始新世的 D₃ 剪切带(表 1)形成了 F₃ 剪切褶皱。这些剪切褶皱再次褶皱, 并使 F₂ 褶皱的轴向从原来的 NE-SE 旋转为 NNW-SSE(图 3A, 4B, C)。再次褶皱和旋转导致了第二区段矿化区的褶皱轴以 NNW-SSE 向为主, 因为 NWW-SSE 向的 F₃ 剪切褶皱使 NE 向的 F₂ 褶皱轴发生了旋转。Goldstrike 金矿的主要褶皱 F₃ 剪切褶皱是 DDZ(Dillon Deformation Zone) 构造带(图 3A, 5A, 6A、B, 7A、B、C)。该带是一个向 NE 缓倾, 走向为

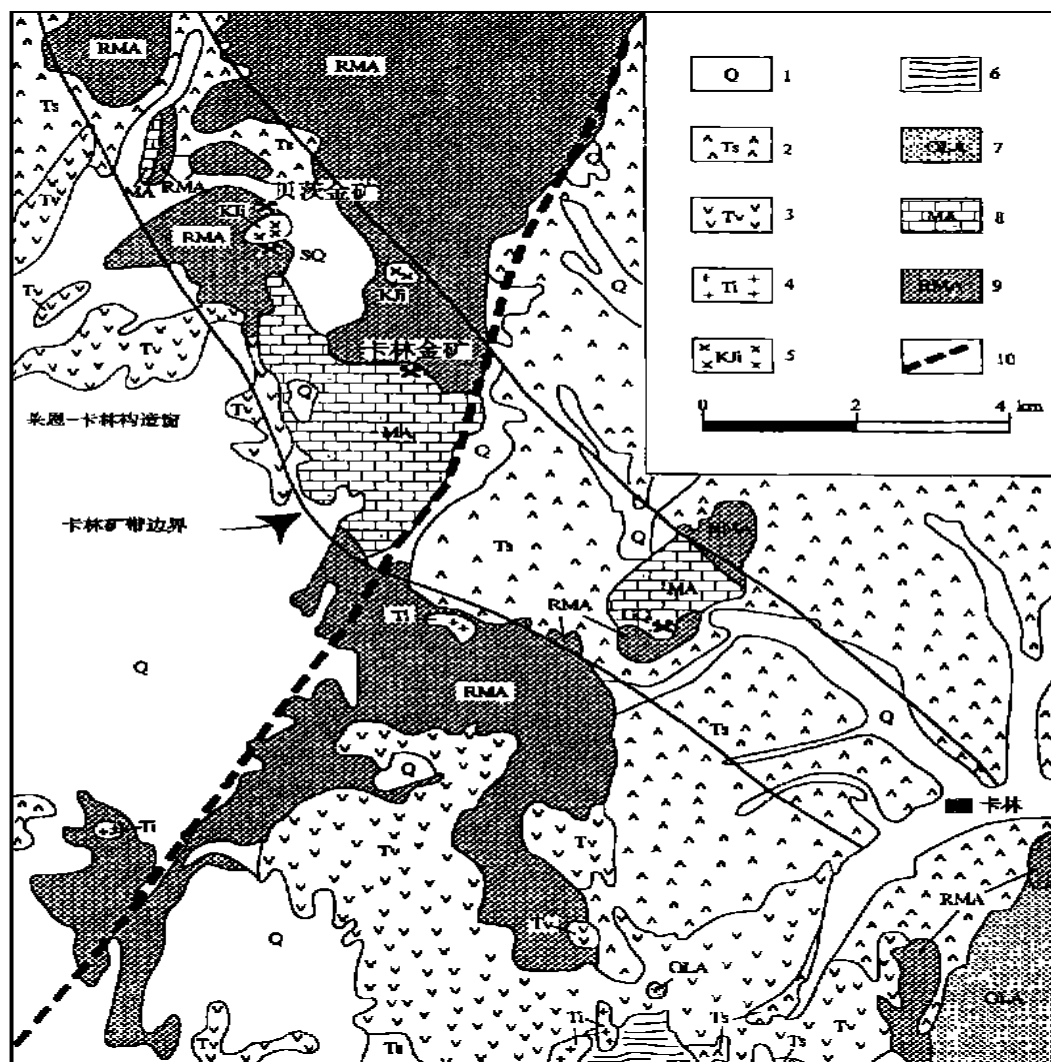


图 2 卡林矿带地质概况及贝茨金矿所在的 Goldstrike 矿区位置图

Fig.2 Geology of the Carlin trend area and location of the Goldstrike Mine area that contains Betze orebody.

1. 第四系 2. 第三纪沉积岩 3. 第三纪火山岩 4. 第三纪侵入岩 5. 侏罗—白垩纪侵入岩
6. 侏罗纪火山岩和沉积岩 7. 二叠系和密西西比期超覆岩系 8. 冒地槽岩石
9. 罗伯茨山异地岩(奥陶-泥盆系) 10. 与线性构造无关的新月谷走向

主要的金矿山:GO-Gold Quarry, SG-Genesis-Blue star, GS-Goldstrike(贝茨金矿)

NWW-SEE 的脆-韧性剪切带和 NWW-SEE 的倾伏剪切褶皱带。贝茨金矿就产在该带中。第二区段中的 DDZ 和其他 NWW 向的 F_3 剪切褶皱及剪切带(图 3A, 4C)对解释卡林型金矿的同变形成因是一个重要的佐证。因为, 如果金矿化与 D_3 变形同时, 矿体的构造组构及矿石结构应与 F_3 构造一致并与之有关。

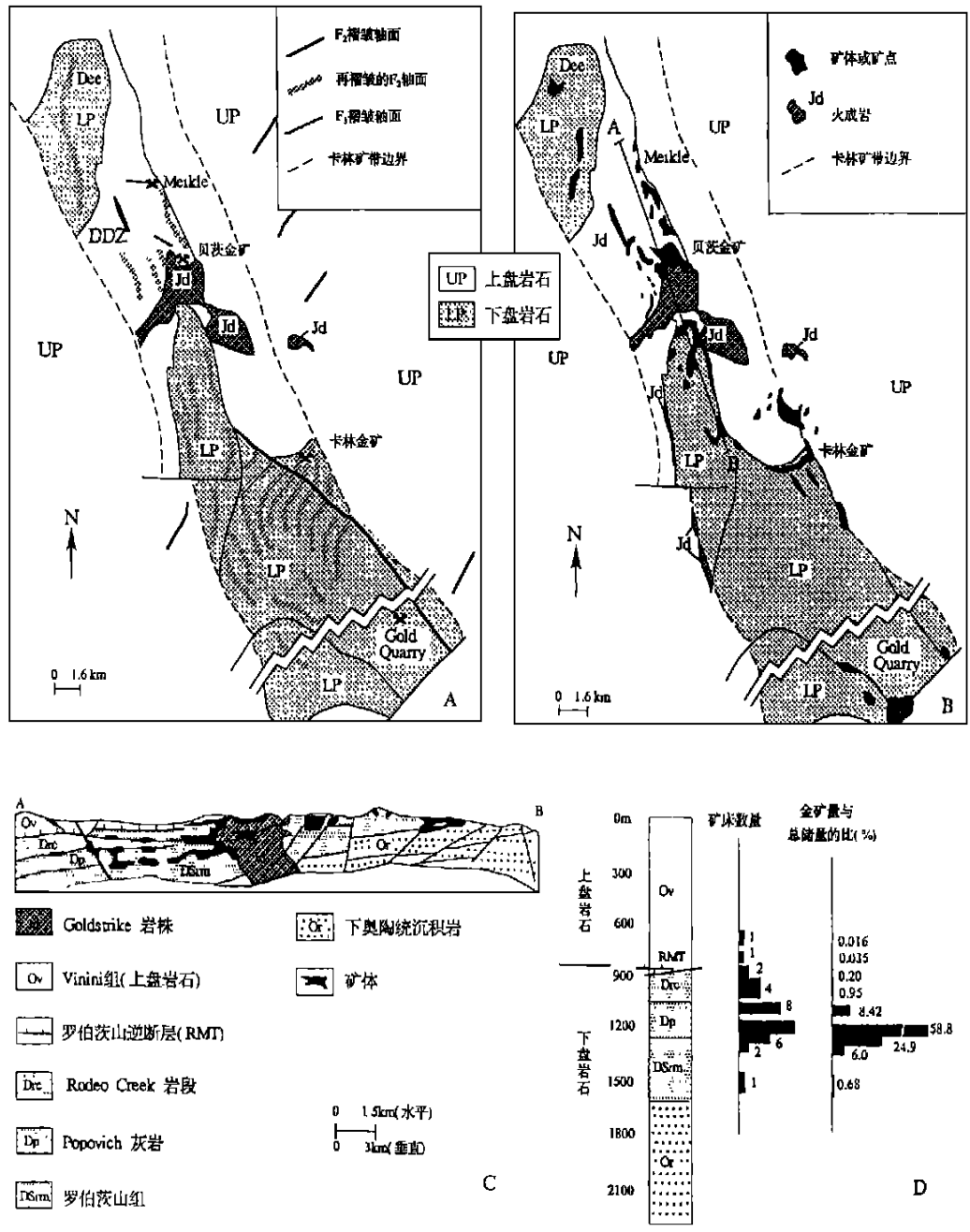


图 3 卡林矿带矿体与构造、地层的关系图

Fig. 3 Relation of orebodies to structure and stratigraphy in the Carlin trend.

A. 卡林矿带褶皱轴向分布位置图 B. 金矿体品位厚度等值线地面投影图。图中显示了 4 个矿体群的分布 (即 Dee, Meikle-Goldstrike, 卡林和 Gold Quarry) C. 通过 Goldstrike 矿体群的 A—B 横剖面图。图中显示大部分矿体均产在 Popovich 灰岩中及附近 D. 矿床数、金矿量与总储量比例关系图

2 Goldstrike 金矿区地质概况

贝茨金矿的围岩经历了蚀变和变形。贝茨金矿的北面为上部波斯特金矿体及北贝茨矿体,其东面为深部波斯特矿体(图5)。这些连续矿体的走向为NNW,向SE缓倾伏,与波斯特背斜的褶皱轴平行。但是贝茨金矿主矿体的走向为NWW,呈近乎水平的倾伏,与DDZ及贝茨背斜一致。有些矿体的延伸部分为NNW向,且深部更不规则。

Goldstrike 金矿区罗伯茨逆冲断层上盘的岩石为奥陶—泥盆系罗伯茨异地岩的硅质碎屑岩,大都属于 Vinnini 组。下盘岩石为泥盆系和志留系的碳酸盐岩、硅质碎屑岩。这些岩石与北面的晚侏罗世(158 Ma)的 Goldstrike 岩株(岩床)等杂岩体接触。这些杂岩体局部矿化。矿区东部及北部出露有中新统的卡林组岩石及第四系冲积物(图5)。

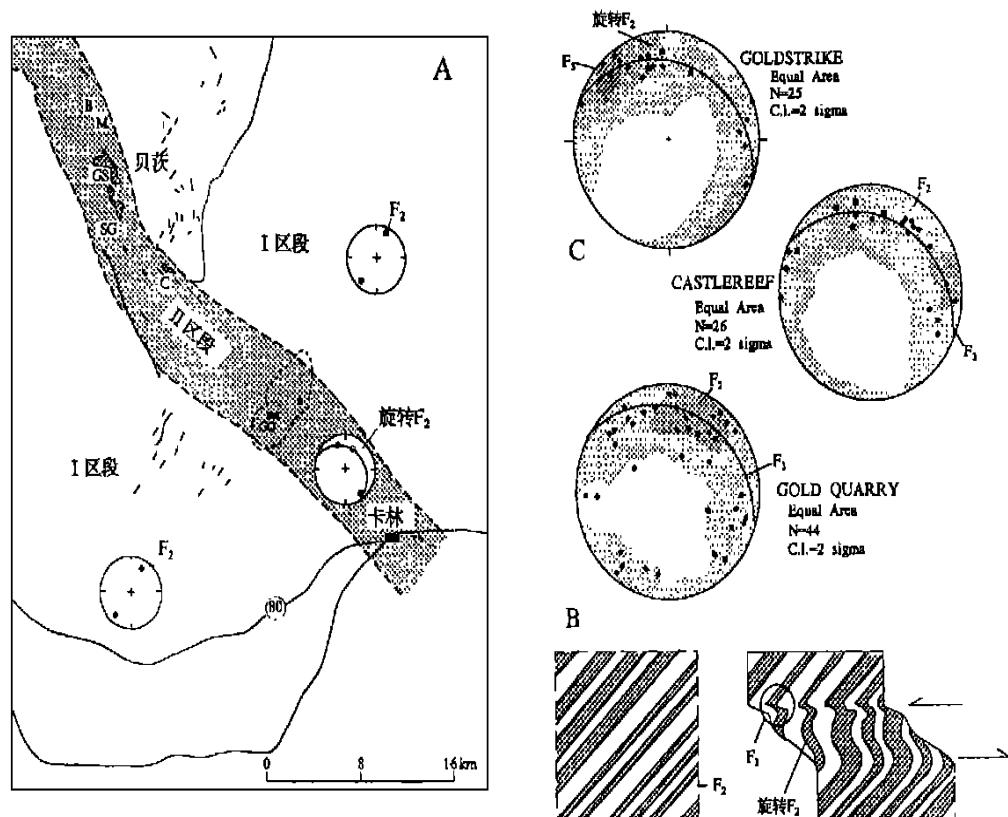


图4 卡林矿带构造要素及变形模式图

Fig.4 Structural elements and deformation model for the Carlin trend.

A. 根据褶皱轴绘出的构造区段图 B. F_3 叠加于 F_2 之上理想模型 C. 三个矿区褶皱轴主体图

2.1 沉积岩

贝茨矿体的沉积岩围岩为罗伯茨逆冲断层下盘的 Rodeo Creek 下岩段, Popovich 灰岩和

围岩中的沉积角砾岩呈层状、透镜状,由碎裂角砾、碎屑流角砾和含化石的杂乱角砾岩组成(Griffin 等 1993; Peters 1997)。沿 Rodeo Creek 和 Popovich 灰岩之间的过渡接触带展布的碎裂角砾岩含有直径为 0.5~2 cm 的层纹状、棱角状的硅质碎屑泥质岩碎屑和由细砂质、粉砂质基质胶结的贝壳碎片。贝茨金矿附近的这些碎裂角砾岩已硅化。碎屑流角砾岩和杂乱化石角砾岩层在 Popovich 灰岩中下部和罗伯茨山组上部 100~230 m 厚度范围内很普遍。杂乱化石层厚 0.5~3 m,含有完整的和破碎的贝壳与化石碎屑。这些沉积角砾岩层构成了贝茨矿体的大部,并经受了接触变质、脱钙、坍塌和构造变形,使其成为热液通道。

2.2 火成岩和变质岩

贝茨金矿的底板和东南部在 Goldstrike 岩株的接触变质带中(图 5, 6A, 6B)。该岩株由均质中粒、局部硅质,含黑云母和角闪石的灰色闪长岩和黄褐色的石英闪长岩组成,并有少量花岗闪长岩,呈薄的不规则的岩墙、岩脉和岩枝侵入到钙质-硅酸盐岩接触带中(图 6)。闪长岩和围岩中还有晚侏罗世的煌斑岩和始新世的中性岩脉(Leonardson 和 Rahn 1966)。

岩株附近的接触变质岩由辉石、黑云母、硅质角岩和大理岩组成,局部叠加了透辉石-钙铝榴石,透辉石-钙铝榴石-符山石,透闪石-绿帘石-方解石,钾长石-透辉石砂卡岩化(Walck 1989)。岩体内有绢云母蚀变。这些接触变质岩和交代变质岩通常为宽 230 m 的带状,产于主接触带和岩枝、岩舌附近,沿 NNW-SSE 向的断层分布,或产于闪长岩和构造断块中,宽 300 米(图 6A)。岩株的 NE 接触带与贝茨矿体 NNW-SEE 的走向一致。闪长岩、钙-硅酸盐岩和大理岩透镜体的结构、构造分析表明,闪长岩和 Popovich 灰岩之间的接触带沿 DDZ 带发生了 F_3 剪切褶皱变形作用。闪长岩被破坏和错断成透镜体。15~70 m 厚的接触变质和交代变质岩形成大面积斑杂状脆性岩石和原始角砾。这些岩石后来经碎裂和角砾岩化,通常被伊利石-粘土和千糜岩包围。野外关系有力地证明,主要金矿化晚于 Goldstrike 岩株。

2.3 构造

卡林矿带中北部的大部分金矿体与 NNW 向断层(如 Post 断层和 JB 断层)有关;或与 NNW 向的褶皱(如 Post 背斜和 Peters 向斜)有关。贝茨金矿中最重要的 NNW-SSE 向褶皱为 Peters 向斜。该向斜由 Rodeo Creek 岩段及其下伏更坚硬的 Popovich 灰岩构成(图 5)。这两套岩石之间的变形过渡层受到 NNW-SEE 向的剪切褶皱变形作用,并在矿体中能进一步角砾岩化,显示有分解、剪切、脱钙、流体流动和褶皱作用。在贝茨金矿的深部,上述两套岩层之下的罗伯茨山组也经受褶皱构成同一个向斜。

贝茨金矿呈 NNW-SEE 走向,与卡林矿带及其平行的断层和褶皱 NNW-SSE 走向比较,相差 $40^\circ \sim 50^\circ$ (图 4)。贝茨金矿体一致的 NNW-SEE 走向的倾伏方向与 DDZ 带有关(图 5, 6, 7)。在 Goldstrike 金矿区,矿体外的褶皱轴及轴面走向为 NNW,而矿体内则为 NNW 向(图 4B)。贝茨矿体内及其附近,所有 NNW-SEE 走向的褶皱轴沿一个大环分布,该环近似于一个走向 300° 、倾向 30° 的面,与 DDZ 带一致(图 5)。贝茨背斜也位于 DDZ 带中并与其走向一致(图 5)。DDZ 带中对称的动力学标志表明出现了左、右旋运动,而错位不明显则意味着变形局限于矿体范围之内,与 Dazhi 和 White 所描述的剪切带内非稳定韧性流一致。

根据 Peters 对矿区内区段 和 的界定,NNW-SSE 走向的 Post 背斜和 Peters 向斜是原走向为 NE-SW 的区域性 F_3 褶皱的特殊例子,NNW-SEE 的 F_3 剪切带将 F_2 褶皱再次剪切和

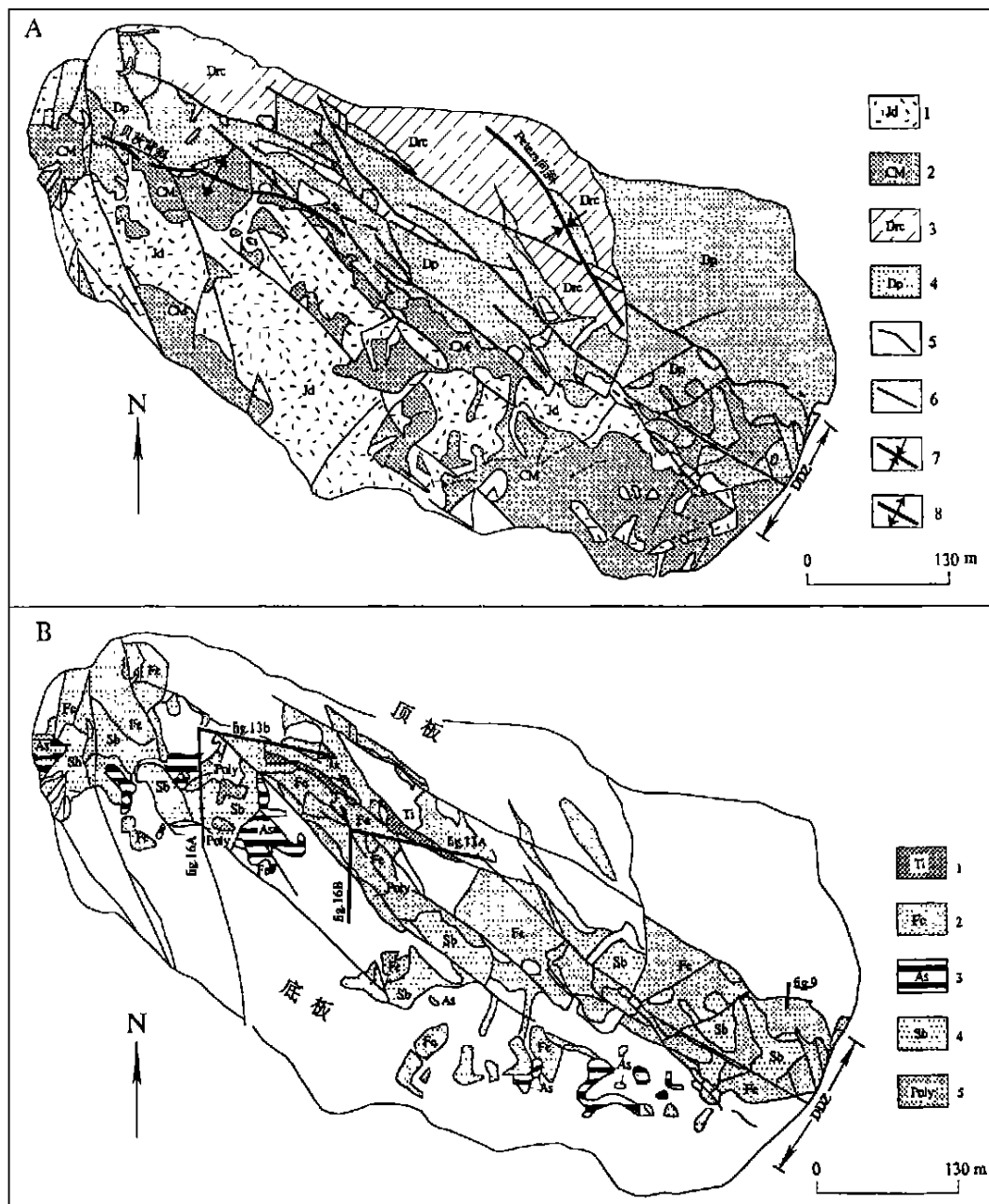


图 6 Goldstrike 矿区 1600 m 标高地质图

Fig. 6 Geology of the 1600m level Goldstrike M mine.

- A. 矿区地质图 1. 闪长岩(J) 2. 接触变质岩钙—硅质大理岩、角岩(J) 3. Rodeo Creek 岩段(D)
4. Popovich 灰岩(D) 5. 地质界线 6. 主要断层 7. 向斜 8. 背斜
- B. 富矿体和蚀变带位置图 1. 含金红石矿石 2. 伊利石-粘土-黄铁矿矿石 3. 含雄黄雌黄矿石
4. 含辉锑矿硅质矿石 5. 多金属矿石

褶皱,并旋转至目前的 NWW-SEE 和 NW-SE 向。图 5 中可见一些再褶皱的轴面走向变化。此外,Post 背斜两翼 100 m 宽的内闭合端也是再褶皱的证据,这些 NNW-SSE 走向的褶皱也可能是与沿 Post 断层和 JB 断层系统发生的走滑断层有关的褶皱作用形成的。其形成时间为侏罗纪。

厚层构造角砾岩是大部分贝茨矿体的围岩,且在 DDZ 带中也很普遍。这些角砾岩产于剪切带、脆性断层和有关的褶皱中或与它们有关,含有角砾岩、碎裂岩、断层泥及千糜岩。主要的构造岩类型包括:(1)沿 Popovich 灰岩与 Rodeo Creek 岩段接触带形成的角砾岩;(2)碎裂岩及断层泥;(3)与 DDZ 带有关的角砾岩和千糜岩。厚 20 m,白色—黑色的矿化、硅化、局部黄铁矿化的碎裂角砾岩由破裂、压碎的泥质岩、脱钙灰岩及泥岩组成。DDZ 带中部的角岩和千糜岩由剪切泥质岩带中未变形的透镜状碎屑、板条及块体组成,剪切泥质岩呈网状包围这些未变形碎块。DDZ 带中的角砾岩形成晚于 Goldstrike 岩株的岩枝和岩脉,因此角砾岩中有大量火成岩碎块。

DDZ 带中各种不同类型岩石的应变是不均一的,在透入性剪切的 1~10 m 厚的千糜岩中的局部应变很普遍。角砾岩被包围在剪切的、含碳质的富伊利石-粘土矿物的千糜岩中。各个蚀变的矿化碎裂状透镜体的构造分隔表明沿各个断层面发生了多次运动。整个 DDZ 带的变形形式也表明溶解、搬运、流体流动、拉开、脱钙及高应变区在空间上与金及其有关地球化学元素的分布是一致的,进而表明热液和变形事件在时间上和空间上可能有联系。因此,可以说至少有部分矿化是与变形同时的。

2.4 矿化

在长 3 000 m,宽 1 200 m,深 200 m 范围内,贝茨金矿周围有 20 个较小的、连续和不连续的矿体。矿区地质填图和钻探已圈定了 $w(\text{Au}) 1 \times 10^{-6}$ 等值线,平均厚度 170 m,宽度为 200 m,走向长度超过 1 500 m(Bettels 和 Lauha 1991; Leonardson Rahn 1996)。贝茨金矿及其周围的蚀变分带形式圈定了一个大的透水、扩容带,其中有大量流体活动。几种不同类型及品级的矿石分布于不连续的富矿体中。中央是一个 $0.3 \times 2 \text{ km}$ 的与高品位金共生的伊利石-粘土、硅化蚀变核。外围是 500 m 厚的脱钙和弱伊利石-粘土低品位矿化带。矿体中金和硫等值线(图 7A, B)表明大部分富矿体产于 NWW-SEE 向的闪长岩和 Popovich 灰岩的接触带,贝茨向斜构造中 Popovich 灰岩与 Rodeo Creek 岩段之间的 NNW-SSE 向接触带、NWW-SEE 向的 DDZ 带,以及横切 DDZ 带的 NEE-SEE 向断层带。

富矿体中含有压碎、蚀变、角砾岩化的围岩碎屑混合物以及断层泥和千糜岩,它们在空间上与围岩的类型、断层和褶皱有关。从平面和剖面上看,富矿体群呈带状产出。从剖面上看黄铁矿和富砷的矿石产于矿体的顶部或外侧,富石英(锑)的矿石产于矿体底部及中部。这些富矿体的穿插关系及其在中等尺度的分布观察表明,贝茨金矿的生成关系可用其他微观的和地球化学的方法来解释其形成时间及成因。因为贝茨矿体是受构造控制的,所以可借助与区域构造-古地热史有关的角砾岩、千糜岩及褶皱之间的关系来确定矿石沉淀的各个成矿作用。

2.5 热液蚀变

贝茨金矿中与金矿有关的围岩蚀变有碳化(碳的带入)、脱碳酸盐(近似脱钙)、泥化(伊利石-粘土)和硅化。成矿前的蚀变组合包括古生代沉积岩中的同生或成岩矿物,以及与

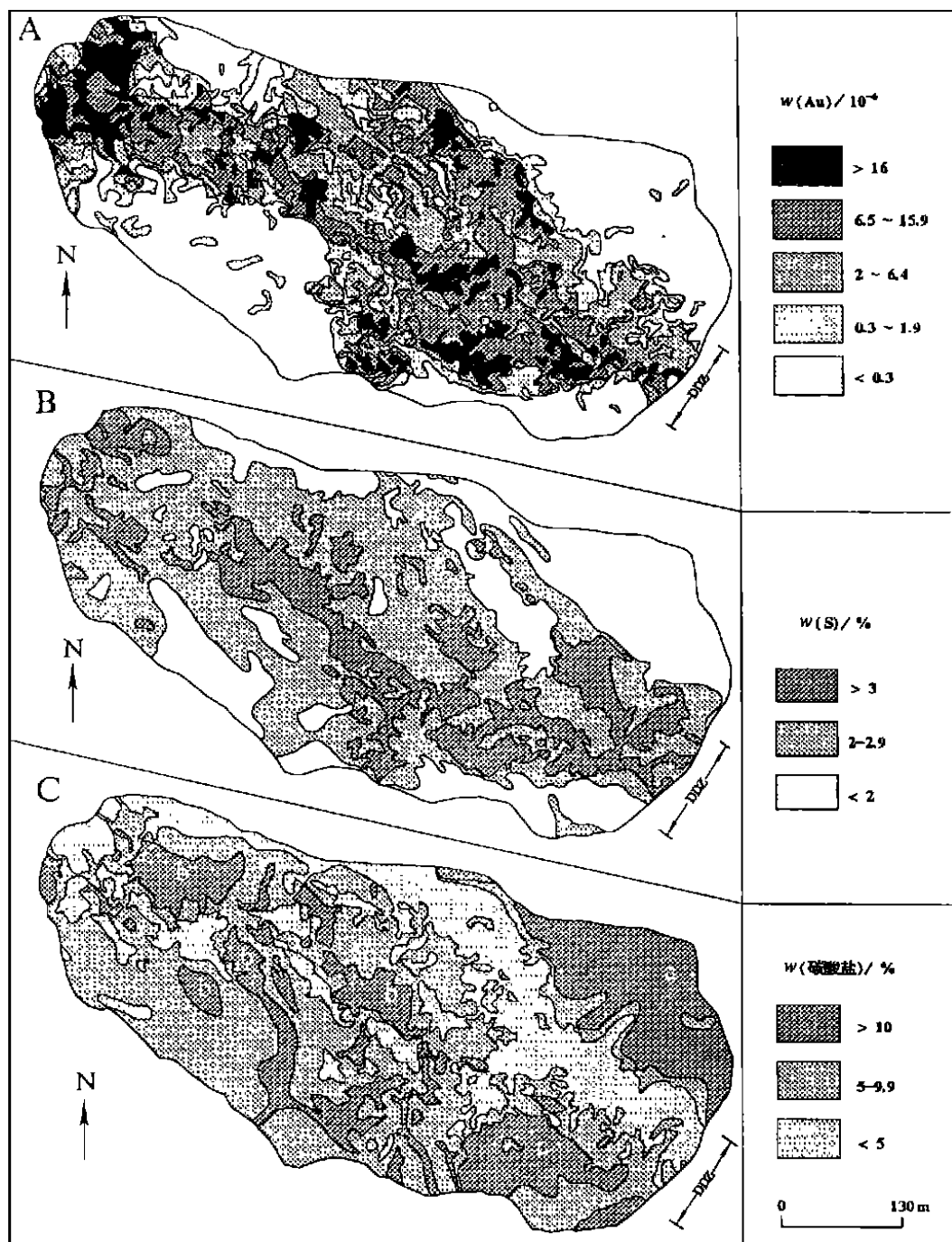


图7 贝茨金矿样品分析等值线图

Fig.7 Contour maps of blasthole assays of Betze orebody.

A. $w(\text{Au})/10^{-6}$ B. $w(\text{硫化物})/\%$ C. $w(\text{碳酸盐})/\%$

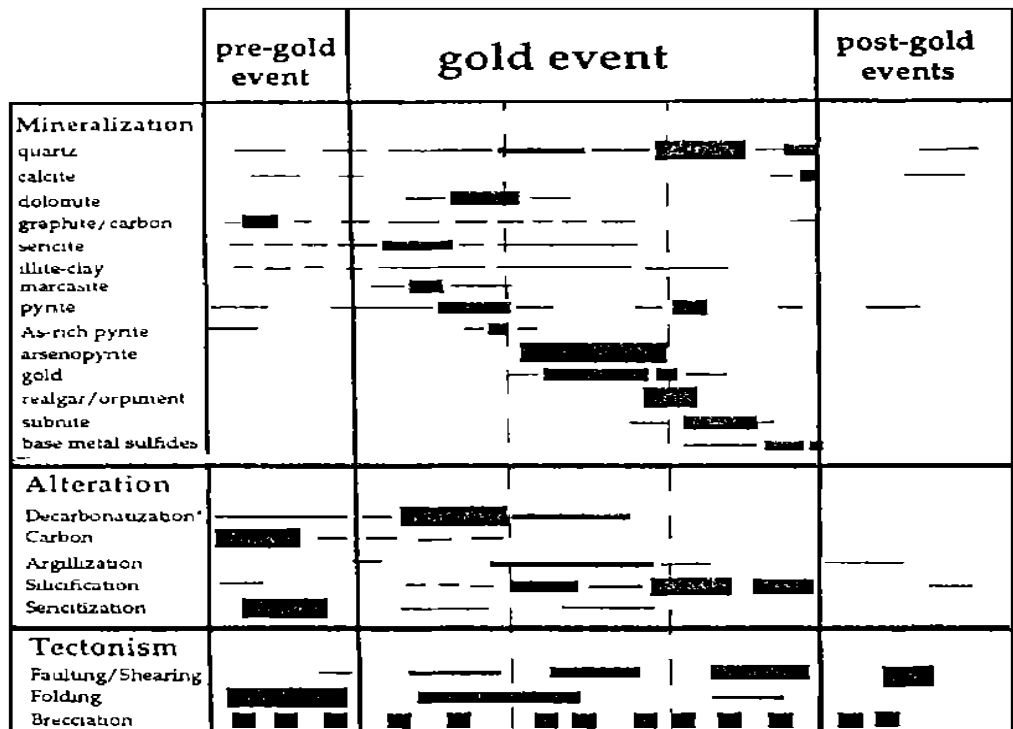
Coldstrike 闪长岩接触带有空间关系的接触变质和交代变质矿物。成矿后的蚀变作用与表生作用有关,局部与和盆地、山脉相伴生的中新世热泉有关(图 8)。贝茨金矿体上部 30 m 的金矿品位高,含有伊利石-粘土矿物组合。下部矿体通常有硅化蚀变。从 $w(\text{Au}) 1 \times 10^{-6}$ 等值线向外的蚀变带具不规则形状,由不连续的黑色含碳质弱伊利石-粘土蚀变和硅质蚀变体组成。贝茨金矿与其他卡林型金矿床之间的区别是:(1)大面积的蚀变;(2)蚀变叠加在接触变质和交代变质的接触带上。另外,贝茨金矿有强烈的构造变形。

碳化作用。成矿前的碳存在于矿体及其周围的黑色-烟灰色沉积岩中。主矿体中 $w(\text{C}) < 1\%$,而矿体以北的围岩 $w(\text{C}) > 10\%$ 。Leonardson 和 Rahn(1996)认为,主矿体外的碳分布情况归因于 Goldstrike 岩株侵入时碳从岩体向外迁移,而金在迁移的碳前锋内的岩株接触带附近沉淀下来。碳通常呈 $2 \sim 15 \mu\text{m}$ 的板状晶体和集合体产于矿石外侧的围岩中,或呈结晶不好的棱角状石墨和碳的颗粒分布在矿石里。在金沉淀期间,碳可能再次迁移,形成沥青-方解石细脉(Ferdock 等 1997)。碳产于上中部矿体顶板沿高角度断层带分布的伊利石-粘土蚀变的沉积岩层及千糜岩剪切带中,以及矿体之上的 Rodeo Creek 岩段和 Popovich 灰岩层中,特别是 Post 背斜中(Peters 1997a)。矿体中局部含碳的地方对研究贝茨金矿的变形史可能是重要的,因为它们代表低剪切强度区,因此也是高应变区。

脱碳酸盐和脱钙蚀变作用在矿体中部形成宽 100 m 的蚀变带,影响到大部分 Popovich 灰岩和小部分 Rodeo Creek 岩段及罗伯茨山组的岩石(图 7C)。脱碳酸盐作用使碳酸盐矿物和大部分 Fe, Mg, Ca 迁移出去。脱钙作用是指方解石的迁出,是野外填图时的常用术语。Leonardson 和 Rahn(1996)指出,脱钙作用沿裂隙垂直扩展入板状的、与层理平行的层中。因此,矿体中部的坍塌角砾岩体通常以层控带的形式产出。在脱碳酸盐和脱钙蚀变期间,灰岩中的 $w(\text{碳酸盐})$ 从 $30\% \sim 4\%$ 降低到小于 1% 。矿体中碳酸盐含量在空间上是不均一的,但在 DDZ 带中部有一条 $w(\text{碳酸盐})$ 含量小于 10% 的相对均一的带(图 7C)。白云岩和煌斑岩中的镁含量大致相似,NNW 向的中部低碳酸盐带中,有几处含碳酸盐较高的地方(图 7C):(1)东北部深灰色未蚀变、微弱变形的 Popovich 灰岩(图 7C 中的 a 区);(2)西南部和西北部沿闪长岩与 Popovich 灰岩接触带分布的未矿化和未蚀变的大理岩(图 7C 中的 b 区);(3)东南部高品位的雄黄-雌黄矿石及被方解石脉包围的无矿大理岩透镜体(图 7C 中的 c 区)。

脱碳酸盐坍塌角砾岩由占体积 $30\% \sim 50\%$ 的厘米级多色他形岩屑, $50\% \sim 70\%$ 细粒、毫米级岩屑基质及伊利石-粘土矿物组成(图 9)。接触变质、伊利石-粘土蚀变、硅化和变形叠加于早期形成的坍塌角砾岩之上,而这些坍塌角砾岩叠加于沉积角砾岩之上(Peters 等 1997)。脱碳酸盐作用增加了灰岩和大理岩的渗透性,提供了含金流体流动的通道。体积的减少及坍塌作用很可能伴随有千糜岩的发育,并在时间上与热液事件的关系密切。许多与坍塌、构造有关的巨大角砾具有定向组构,表现为灰岩或大理岩透镜体被富伊利石-粘土矿物及千糜岩所包围(图 7C 中的 a, b, c 区)。这表明,这些千糜岩带就是流体通道,并且大部分溶解和坍塌作用与应变同时发生。

泥化-伊利石-粘土蚀变在贝茨金矿上部 30 m 范围内很普遍,形成松软的、拉长的蚀变岩块。伊利石-粘土矿物蚀变还呈广泛的中型的层和与石英成互层的微型层产出,尤其在矿体下部更为明显。在卡林矿带的中北部,伊利石-粘土蚀变通常与金矿有关(Drews Armitage 等



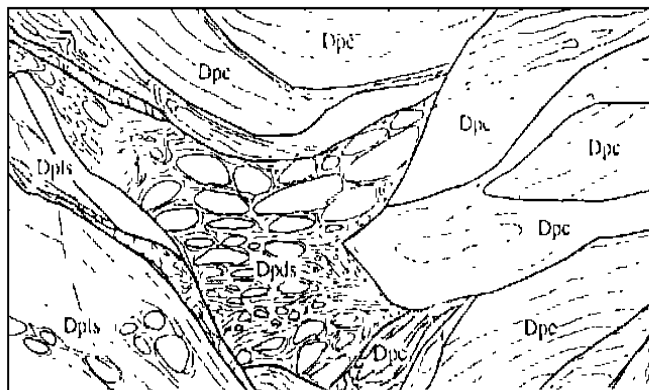
*includes decalcification

图 8 贝茨金矿矿物生成顺序及阶段划分图

Fig.8 Summary of paragenesis of minerals and events in the Betze orebody

NORTH

SOUTH



- Dpls Popovich 灰岩 (泥盆系, 未蚀变)
- Dpc Popovich 灰岩 (泥盆系, 粘土化和矿化)
- Dpds Popovich 灰岩 (泥盆系, 未蚀变透视体和脱钙的构造化粘土混合层, 显示分解结构)

0 5 10 m

图 9 1600 m 标高多个开采台阶综合岩石结构素描图

Fig.9 Example of mesoscopic dissolution textures in a multiple bench sketch on the 1600m level.

1996)。伊利石是主要的粘土矿物相,但局部也有地开石、蒙脱石和高岭石,它们单独产于岩石中或在伊利石中形成互层。闪长岩蚀变成松软的、白色—绿色—褐色的岩石,残留有火成岩结

构。暗灰色的 Popovich 灰岩蚀变成了松软的、乳白色、灰色或黑色的富含粘土、硫化物和碳质的岩层。Popovich 灰岩的蚀变部分通常经历了剪切或褶皱作用而成为松软的岩石, 包围那些未蚀变的、坚硬的、1~10 m 大小的透镜或圆形的未变形块状灰岩、大理岩或钙-硅酸岩。贝茨金矿中各种岩石的伊利石结晶度都相似: 在千糜岩中为 $0.36 \sim 0.54 \text{ } 2\theta$ 在粘土断层泥中为 $0.38 \sim 0.41 \text{ } 2\theta$ 在脱钙岩石中为 $0.38 \sim 0.57 \text{ } 2\theta$ 在伊利石-粘土蚀变粉砂质灰岩中为 $0.39 \sim 0.53 \text{ } 2\theta$ 这些岩石中伊利石结晶度 $0.2 \Delta 2 \theta$ 范围与 Robinson 等(1990)所讨论的伊利石结晶度测量的可信最小值($0.1 \text{ } 2\theta$)相近。这表明, 这些岩石中的粘土矿物有时达到相似的温度, 并且与同步变形和热液蚀变一致。蚀变的闪长岩和钙-硅酸岩中伊利石结晶度为 $0.73 \sim 1.05 \text{ } 2\theta$, 表明这些岩石达到的温度较低, 或者增加了粘土矿物, 如与伊利石互层的蒙脱石。

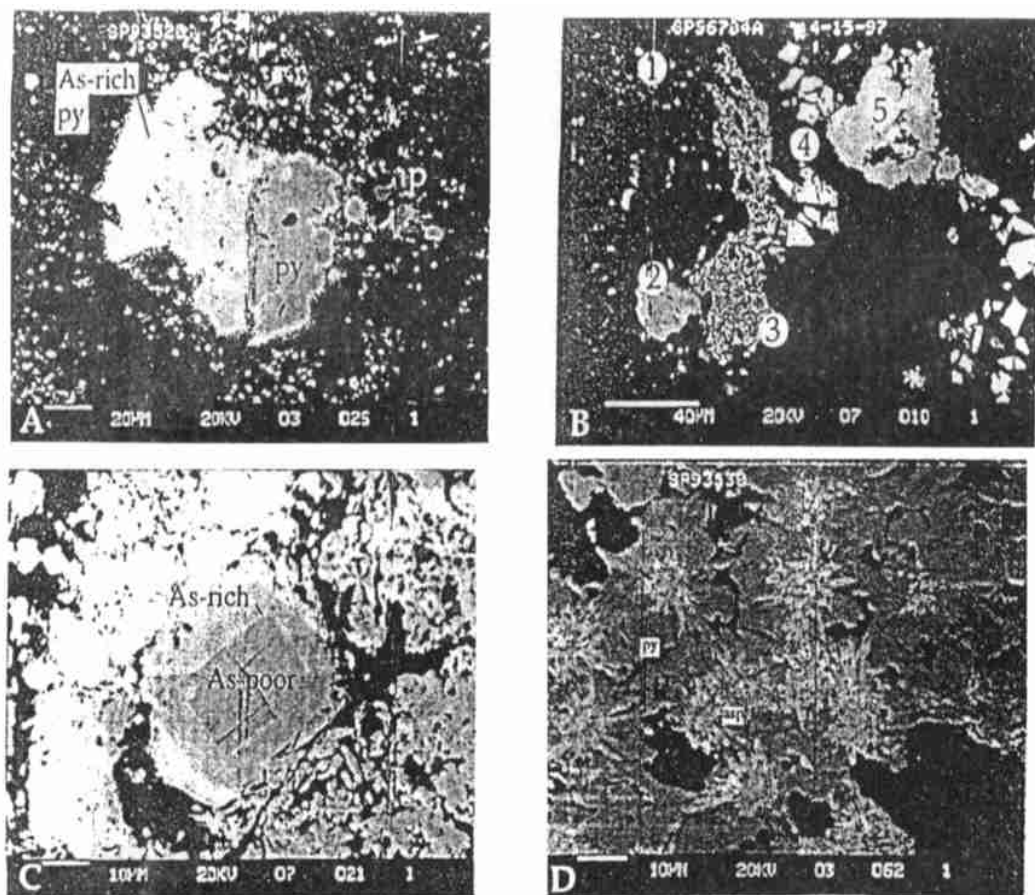
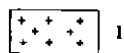
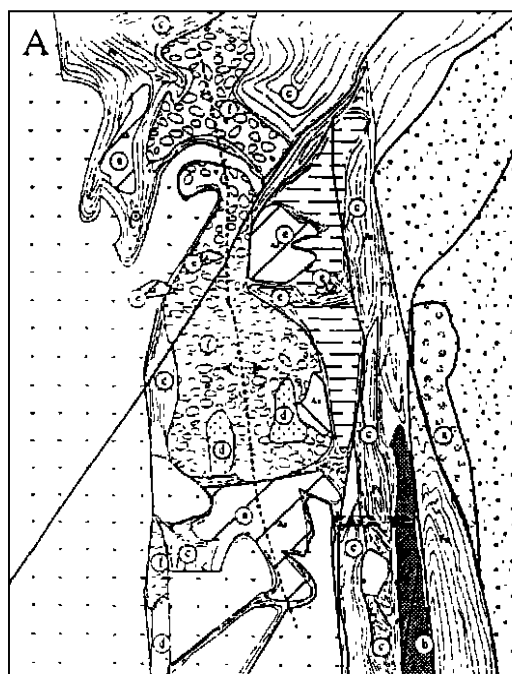


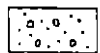
图 10 贝茨金矿中不同结构和形态的黄铁矿照片

Fig. 10 Photomicrographs of different textures and morphologies of pyrite in the Betze orebody.

- A. 自形晶黄铁矿上的富砷边 B. 5 个分离的黄铁矿结构(200 mm 宽): ①浸染状; ②角砾、浑圆状;
③海绵状; ④破碎角砾棱角状; ⑤具富砷边的黄铁矿 C. 碎裂自形黄铁矿周围的振荡黄铁矿
(淡色区富砷, 暗色区贫砷) D. 不常见的逆向分带黄铁矿, 核部为砷黄铁矿(亮点),
放射状中心部分富砷, 边部贫砷, 这种逆向分带的黄铁矿在接触变质时富集



1



2



3



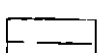
4



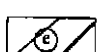
5



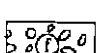
6



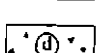
7



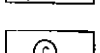
8



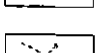
9



10



11



12

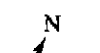
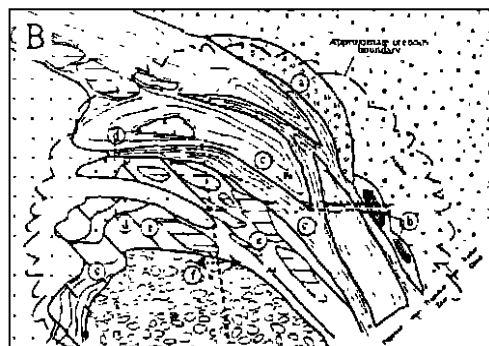


图 11 贝茨金矿中上部富矿分带的平、剖面示意图

Fig. 11 Generalized diagrammatic plan and section of zoned oreshoots in the upper central Betze orebody.

A. 闪长岩(左)和 Rodeo creek 岩段(右)之间的 Popovich 灰岩中的金矿各组成部分的理想平面图 B. A-A' 剖面图(位置见图 6B)通过矿体中部的理想投影草图

1. 闪长岩(侏罗纪) 2. Rodeo creek 岩段泥质岩 3. 碎裂角砾岩(伊利石-粘土-黄铁矿矿石) 4. 含金红石硅质角砾岩 5. 碳质构造岩(伊利石-粘土-黄铁矿矿石) 6. 脱钙灰岩和大理岩(伊利石-粘土-黄铁矿矿石) 7. 残留的灰岩和大理岩 8. 含雄黄雌黄角砾岩 9. 含辉锑矿角砾岩 10. 多金属角砾岩 11. Peters 的矿石分类(1996, 1997a) 12. 贝茨背斜



硅化出现在上部矿体的顶底板围岩的各个角砾岩层中。未经角砾岩化的岩石硅化不发育, 矿体下部的硅化有所增强(图 11B)。硅化主要产于角砾碎屑之间, 由交代角砾的隐晶或微晶石英组成, 有时呈 1~2 mm 的细脉切割角砾碎屑。在局部地方常见多期硅化, 如细粒石英交代角砾岩碎屑, 粗粒石英交代角砾或形成角砾岩的基质。Leonardson 和 Rahn(1996) 观察到至少 5 期的硅化, 其中一些与卡林金矿床的石英细脉期相似。含富砷的成金期黄铁矿的石英细脉通常平行千糜状的面理产出, 并且呈破碎状, 表明在硅化期间及其后发生了剪切带的活动。硅化角砾岩及破碎带通常由于构造作用而分隔开, 并为千糜状的伊利石-粘土层或断层泥所包围, 这也表明剪切带的运动发生在硅化之后。在一些硅质角砾岩中, 部分基质未被石英充填或交代, 由棱角状空隙组成, 与裂隙状角砾岩相似。硅化的部位含有微型和中型的伊利石-粘土混合带。伊利石-粘土和二氧化硅条带沿层面或沿变形组构层呈互层产出。闪长岩、角岩和钙-硅酸岩中的硅化少见, 但是接触变质和交代变质岩中残留的成金以前的微晶二氧化硅成为硅化富矿体

中大部分角砾碎屑的原岩。

2.6 矿物生成顺序

根据野外及室内工作结果, 可将贝茨金矿的矿物沉淀分为成金前, 成金期和成金后三个阶段(图 8)。Ferdock 等(1997)又将成金期划分为三个亚期。成金前的主要事件为: (1) 古生代碎屑或成岩事件; (2) 与晚侏罗纪 Goldstrike 岩株有关的接触变质、交代变质或热液贱金属为主的矿物沉淀; (3) 早期的碳氧化合物迁移。成金后阶段有少量深成和表生矿物的形成。

贝茨金矿的成金期矿石沉淀是从浸染状黄铁矿开始, 其后为富砷的黄铁矿(图 10)和微米级的金。金呈单独的矿物相或包含在早期黄铁矿的富砷边缘部位, 与前人对其他卡林型金矿床的研究结果相似。大部分研究者揭示的矿物相之间的时间关系都是从具富金、砷边缘的黄铁矿沉淀开始, 然后是富含雄黄、重晶石、辉锑矿和汞矿的矿石沉淀。这种生成顺序与典型的卡林型金矿床的地球化学模式相同。该模式根据流体-岩石反应及 $w(\text{NaCl})_{\text{eq}} < 10\%$ (中等盐度) 的热液系统从 210 ~ 200 冷却到 180 ~ 150 建立起来的 (Hofstra 等 1991; Woitsekhowskaya 和 Peters 1998)。

地球化学模式还表明, 热液流体含有金的络合物 $\text{Au}(\text{HS})_2$, 砷的络合物 H_3AsO_3 , 锑的络合物 $\text{Sb}(\text{OH})_3$ (Woitsekhowskaya 和 Peters 1998)。矿石中的 Au, As, Sb 和其他组分在初始压力大约为 $1.2 \times 10^8 \text{ Pa}$ 的条件下由络合物从矿体外部搬运到沉淀的地方。矿体中的蚀变分带是在成矿系统冷却、压力减少时由矿液与围岩反应形成的。在溶解-沉淀反应期间(包括碳酸盐溶解), 硅质的淋滤和固着以及硫化物的沉淀控制了矿体的质量转换。质量转换的计算 (Woitsekhowskaya 和 Peters 1998) 表明, 金的沉淀与系统中活性铁的硫化有关。硫化进一步在系统中形成较高的氢及较低的硫化物硫化学活动性, 使 H_3AsO_3 和 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 络合物不稳定, 金与富砷的黄铁矿一同沉淀下来。这种模式与 Rytuba(1985), Hofstra 等(1991)及 Stenger 等(1998)提出的卡林型成矿系统金的沉淀机制相似。在矿液与围岩反应期间, 围岩中铁的硫化是金的主要沉淀机制。

虽然微观的矿物组合不大确切, 但通过不同的矿物组合如砷黄铁矿、雄黄、辉锑矿、石英、方解石等, 可从宏观上区分不同的矿石类型(图 10B)。贝茨矿体中至少有 5 种类型的黄铁矿, 包括不稳定分带及罕见的逆向分带黄铁矿, 表明局部复杂的矿物生成顺序。富砷的黄铁矿之后是雄黄、雌黄和方解石的沉淀, 以及同时沉淀但在空间上彼此分开的石英、重晶石、辉锑矿和闪锌矿(图 8)。成金期的矿物组合有相似的组成、形态及形式, 但出现在 DDZ 带的不同部位, 被断层泥和千糜岩分隔开。各种矿石类型在构造上和几何形态上的相似性表明, 它们形成于相似的构造环境, 而不是不同时间的多个矿化系统或事件造成的。

由于热液流体的反复循环, 与金伴生的热液矿物发育的演化阶段是叠加在一起的, 因此不同矿物组合既可以先后形成, 也可同时形成, 这取决于热液在矿体中的流动途径(Ferdock 等 1997)。金矿化事件的演化从最初有利于早期金沉淀环境的形成到主要的金沉淀事件, 之后是方解石和石英沉淀(图 8)。大部分脉石矿物形成较晚, 表示溶液中残留的元素的富集与沉淀, 主要是 Sb, As, Ba, Fe, S 和少量的 Zn, W, In, Co, Cd, Se, Cs, Tl 和 Hg。一些硫酸盐矿物(重晶石、石膏)和一些碳酸盐矿物(方解石、白云石、菱铁矿)沉淀也较晚。

(未完待续)