

陕西八卦庙金矿脆-韧性剪切带控矿特征及成矿构造动力学机制

冯建忠¹ 邵世才¹ 汪东波¹ 王学明² 马治国³

(1.北京矿产地质研究所,北京 100012 2.中国地质调查局发展研究中心,北京 100083;
3.陕西八卦庙金矿,陕西 凤县 721700)

摘要:八卦庙金矿是秦岭造山带唯一的超大型金矿床,曾被认为是微细浸染型(卡林型)金矿。但最新研究表明该矿床金为粗粒可见金,矿床空间定位和矿体展布受二里河—长沟—八卦庙—空棺沟脆-韧性剪切带控制,矿区内岩石剪切变形特征明显。在脆韧性剪切过程中形成了NW向顺层无根揉皱状含金石英脉,石英脉Ar-Ar坪年龄为(232.58±1.59)Ma,等时线年龄为(222.14±3.45)Ma,是印支期脆-韧性剪切-动力变质分异的产物。这种NW向石英脉含金 $1\times 10^{-6}\sim 4\times 10^{-6}$ 。在燕山早期,剪切带抬升进入浅层叠加了脆性变形,在热液作用下形成了NE向石英脉。NE向石英脉是重要的富矿石,含金 4×10^{-6} 以上。石英强烈的脆-韧性变形特点记录了两期变形,从早到晚石英位错和差应力具从大到小的演化趋势。韧性剪切和后期脆性变形每一期构造-热液脉动式活动都是从早到晚 $\Delta\sigma$ 值降低,在两次脉动式活动的交替时期出现的构造亚稳定期成矿,应力周期形成的“应力泵”或“地震泵”作用是金矿成矿的力学机制。

关键词:秦岭造山带;八卦庙金矿;脆韧性剪切带;应力泵;成矿构造动力学机制

中图分类号:P618.51 P613 文献标识码:A 文章编号:1000-3657(2002)-01-0058-09

秦岭造山带以产微细浸染型(卡林型)金矿而著称^[1-2],八卦庙金矿是秦岭造山带唯一的超大型金矿,是典型的受脆-韧性剪切带控制的超大型金矿床。本文试图通过对八卦庙金矿剪切带地质特征和成矿构造动力学机制研究来探讨秦岭造山带大型超大型金矿的成矿地质条件和找矿标志。

1 矿床地质特征

八卦庙金矿位于秦岭造山带凤太矿集区西部,为秦岭褶皱系南秦岭印支褶皱带,凤县—镇安褶皱束西端北缘。构造上为苏家沟—空棺复向斜西端北翼的八卦庙次级向斜。由于长沟—二里河脆-韧性剪切带通过矿区,所以本区岩石有强烈的脆韧性剪切变形^[3-5]。区内褶皱、断裂相当发育,总体构造方向为北西西,由一系列轴向北西西向的紧闭线状褶皱和断裂组成,糜棱岩化强。另外,还叠加了北东、北西及近南北向断裂。矿区内发育一些中酸性脉岩,矿区

东南出露有西坝岩体。中泥盆统星红铺组是八卦庙金矿的含矿地层。容矿岩石为浅变质细碎屑岩类,主要岩性有斑点状粉砂质绢云千枚岩、铁白云石绢云母千枚岩。组成矿物主要有绢云母、白云母、石英、铁白云石、方解石、钠长石、绿泥石以及一些铁的硫化物等。容矿岩石的化学成分与一般碎屑岩比较,CaO和有机碳的含量较高。

矿体呈似层状、层状或透镜状产出,沿走向和倾向均具有分支复合膨胀狭缩乃至尖灭现象。总体产状与围岩一致,其产状和形态受层间破碎带和区域构造双重控制。

金矿石有3种类型:一类为破碎带强蚀变岩;另一类由含金石英脉组成;第三类则由含金铁白云石石英脉组成。石英脉型矿化有两种类型:一种为NW早期顺层无根揉皱石英脉,受脆韧性剪切构造控制,NW向石英脉含金 $1\times 10^{-6}\sim 4\times 10^{-6}$;第二种为NE向切层石英细脉、网脉。一般后者比前者品位高,含金

收稿日期:2001-10-16;改回日期:2001-11-15

基金项目:国家重点基础研究项目(G1999043213)和国家科技攻关项目(96-914-01-04)联合资助。

作者简介:冯建忠,男,1960年生,博士,高级工程师,长期从事矿床地质和地球化学研究工作。

4×10^{-6} 以上。

八卦庙金矿与微细浸染型(卡林型)金矿差别较大,金主要呈自然金产出,多呈不规则状、片状、树枝状,少数呈晶型较好的五角十二面体。金粒度变化较大,明金($>0.07 \text{ mm}$)占80%,微粒金占20%^①。自然金的成色为836~960,平均888,多为含银自然金。

2 剪切带空间展布及构造变形特征

2.1 剪切带空间展布

秦岭造山带在印支期陆-陆碰撞和陆内造山作用过程中形成一系列的推覆构造,在逆冲推覆过程中形成了一系列脆韧性剪切带^[5]。从外围经长沟进入八卦庙金矿区发育了一条脆-韧性剪切带(图1),

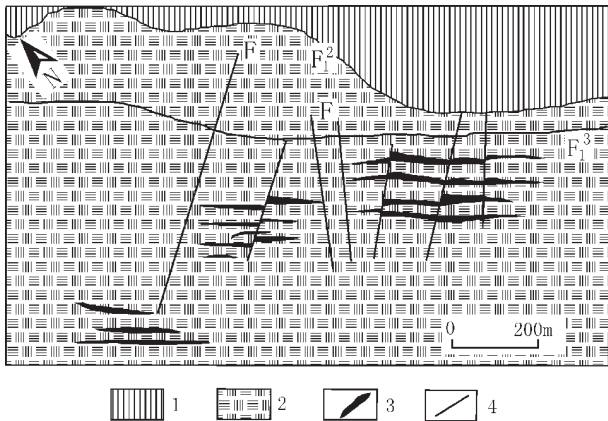


图1 陕西凤县八卦庙超大型金矿床矿区地质图
(据方维萱, 2000, 修编)

Fig. 1 Geological map of the superlarge Baguamiao gold deposit, Fengxian, Shannxi

(modified from Fang Wen-xuan, 2000)

1—古道岭组 2—星红铺组 3—矿体 4—断裂

八卦庙金矿受该剪切带和西坝花岗岩共同控制。凤太地区多期构造复合叠加,不同构造层次共存,构造形迹复杂多样,总体为长期左旋剪切运动产生的推覆构造。凤太地区剪切带为华北板块和扬子板块碰撞造山运动形成的一系列挤压构造带,晚期岩浆活动使构造带局部产生了剪切应力作用并经历了多期成矿活动。挤压作用形成导矿的构造通道,剪切作用形成容矿构造和动热成矿作用。

2.2 剪切带内的岩石变形特征

本区脆-韧性剪切带宏、微观标志相当明显,构

造透镜体、石香肠、雁列脉、膝折脉、无根褶皱、A型褶皱、不对称碎斑、S-C组构、糜棱构造、云母鱼、核幔结构、石英变形纹、变形条带、压力影、矿石矿物(金属、非金属)的拉长定向构造,旋转碎斑等,都可做为该脆-韧性剪切带的佐证。

(1)广泛发育的面理构造(包括糜棱面理和剪切面理),并组成特征的S-C组构。区内岩石的宏观面理产状为 $160 \sim 190^\circ \angle 40 \sim 60^\circ$ 。

(2)沉积作用中形成的钙硅质条带在后期脆韧性剪切中受到剪切变形,被拉断呈蝌蚪状、纺锤状、扁豆状雁行定向排列。可以见到较多的石香肠构造、无根褶皱、揉皱石英脉、构造透镜体、鞘褶皱等宏观变形标志。

(3)广泛存在的不对称旋转残斑和残块,碎斑主要由石英颗粒组成,残块主要为浅变质碎屑岩的颗粒。也可见到以变形石英作为旋转碎斑的核幔构造。

(4)糜棱岩中由强烈拉伸形成的石英晶体构成的“缎带”、S-C组构、不对称残斑、云母鱼、膝折及黄铁矿或磁黄铁矿形成的压力影。

(5)糜棱岩化强烈,生成了大量的糜棱基质。组成糜棱基质的矿物主要有绢云母、绿泥石、细粒化的石英等。镜下观察发现,残余的黑云母周围存在着新生的绿泥石,故这些绿泥石可能是脆-韧性变形过程中黑云母退变的产物。

(6)广泛发育的矿物拉伸线理,在矿区各类糜棱岩中,经常可看到一些矿物(如石英、磁黄铁矿)由于剪切变形作用而成为长条状或柱状,构成拉伸线理。根据线理的侧伏方向和侧伏角可判断脆-韧性剪切带的运动性质。

另外,八卦庙金矿石英脉做的透射电镜扫描照相也证明有石英剪切晶格滑移位错的现象(图4)。

3 剪切带形成时代

3.1 样品采集及制备

八卦庙金矿发育大量的NW向顺层石英脉,这种石英脉表现为顺层、无根揉皱,塑性流变特征明显^[6],脉壁不平整,为波状、锯齿状。笔者对这种含金石英脉做了Ar-Ar年龄测定,获得了可靠的年代学数据。所采样品经磨片在显微镜下观察后,再破碎选样。石英样品破碎后先手选,再碎至 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$,

① 郭键. 陕西八卦庙金矿床成矿地质背景、矿床特征及成矿预测研究. 西北有色地质研究所科研报告, 1994.

经淘洗晾干后,在双目显微镜下手工挑选,样重2 g。为了减少包体成分及过剩Ar的干扰,做到所选的石英样品新鲜、透明,纯度99%以上。

3.2 测试方法、坪年龄和等时线年龄谱

测试在中国科学院地质与地球物理研究所 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年实验室进行。首先将样品送到反应堆进行快中子照射,照射时间为60~80小时,快中子积分通量为 $1\times 10^{18}\sim 3\times 10^{18}/\text{cm}^2$;然后对照射后的样品取回做 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段加热实验。将样品置于RGA-10气体源质谱计与析Ar仪联合系统中进行Ar的提取与纯化,最后用英国VSS公司RGA-10气体源质谱计做静态同位素分析。并注意实验流程中加长气体净化时间及低温条件下的吸附、数据处理中的扣除来校正Cl和过剩 ^{40}Ar 的干扰,取得了精确的结果^[7]。

样品采用逐级升温加热法提取Ar进行质谱分析,中子活化照射参数及各温度条件下的Ar同位素比值、 ^{39}Ar 析出百分比和相应的视年龄值见表1,依有

关数据绘成 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱和等时线。

年龄谱显示了低温和高温阶段气体的视年龄大,中温阶段视年龄小的特点。在430℃条件下,样品释放出的 ^{39}Ar 为6.7%,其视年龄值较高,为459.39 Ma。由于此阶段石英含有流体包裹体(其中含K、Cl),故该年龄值无地质意义。当温度分别由530℃升至750℃,样品释放出的 ^{39}Ar 分别约占52.5%,其视年龄值最低,为229.21~235.40 Ma。当温度由850℃持续升至1 500℃时,样品释放出的 ^{39}Ar 占40.56%,其视年龄值逐步升高,为341.62~758 Ma。形成一条似“马鞍型”的年龄谱,代表测试样品中含有过剩Ar^[8]。所以低温和高温部分气体给出的视年龄,不具地质年代学意义,而年龄谱中最小的视年龄代表了石英的形成时代^[9~10]。所以坪年龄(232.58 ± 1.59) Ma代表八卦庙金矿石英的形成年龄(图2),为印支晚期。

由于上述坪年龄数据是同一样品经多次加热

表1 NW向石英脉 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 快中子活化法地质年龄数据
Table 1 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ fast-neutron activation age data of the NW-trending quartz veins in the Baguamiao gold deposit

加热阶段	加热(℃)	($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) _m	($^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) _m	($^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) _m	($^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) _m	$^{39}\text{Ar}_k$ (10^{-12}mol)	($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}_k$) $\pm 1\sigma$	$^{39}\text{Ar}_k$ (%)	视年龄 t $\pm 1\sigma$
1	430	100.68	0.226 8	2.898	0.134	0.673	34.23 ± 0.03	6.7	459.39 ± 13.78
2	530	38.705	0.076 1	1.070 2	0.054 5	1.826	16.37 ± 0.00	18.1	234.32 ± 2.91
3	640	32.164	0.055 1	0.78	0.049	2.314	15.99 ± 0.00	23	229.21 ± 2.74
4	750	47.59	0.106 4	2.214 4	0.1044	1.153	16.45 ± 0.00	11.4	235.40 ± 3.41
5	850	70.976	0.158 3	2.396 3	0.182	0.877	24.61 ± 0.01	8.73	341.62 ± 7.19
6	980	78.55	0.159 4	3.008 5	0.211 5	0.798	31.93 ± 0.02	7.95	431.93 ± 10.22
7	1 100	97.966	0.196 6	3.738 3	0.267 7	0.682	40.50 ± 0.03	6.79	532.21 ± 16.84
8	1 250	102.76	0.207 6	3.367	0.280 2	0.668	42.03 ± 0.03	6.65	549.54 ± 18.63
9	1 350	118.75	0.234 3	4.054 4	0.332	0.592	50.24 ± 0.04	5.89	639.75 ± 26.94
10	1 500	166.66	0.358 5	3.931 6	0.459 6	0.458	61.64 ± 0.08	4.55	758.00 ± 56.05

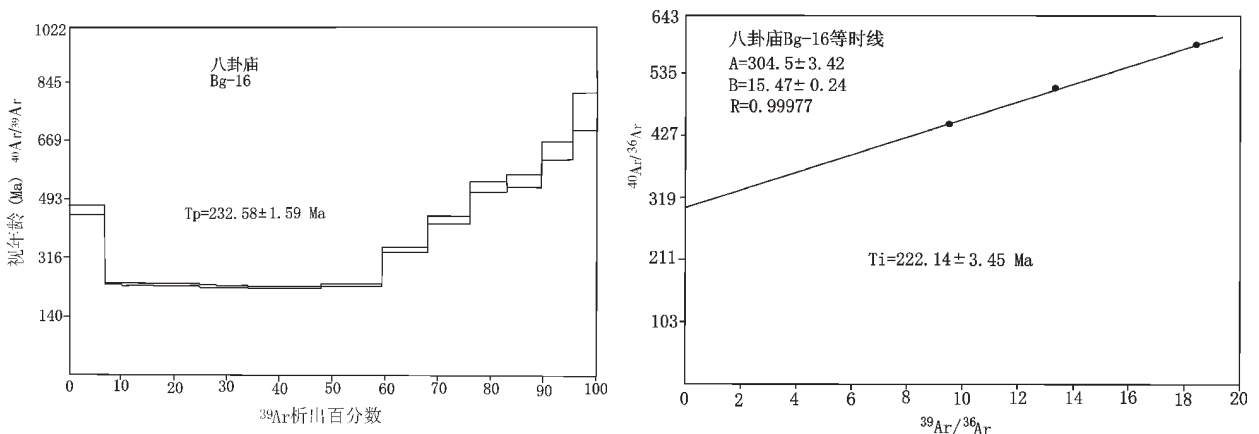


图2 八卦庙金矿床NW向石英脉Ar-Ar坪年龄(左)和等时线(右)年龄图

Fig. 2 Plateau age (left) and isochron age (right) of the Baguamiao gold deposits

测定的结果, 样品满足同源、同时和化学封闭等条件^[7], 可利用坪年龄的数据点进行等时线年龄的计算。石英样品在中温阶段的数据点, 求得等时线, 其相关系数 $r=0.99977$ 。

等时线年龄分别为 222.14 Ma, 该值与坪年龄值 232.58 Ma 接近。据邵世才等^[11]对八卦庙金矿晚期石英脉年龄测定, Ar-Ar 坪年龄为 (131.91±0.89) Ma, 等时线年龄为 (129.45±0.35) Ma。

4 脆-韧性剪切带对金矿的控制作用

八卦庙矿区与成矿有关的构造主要有两期: 一期(晚印支期) 以 NW 向韧性剪切带为主, 兼含与其伴生的一系列其他构造; 另一期(燕山早中期) 以 NW 剪切带内液压致裂脆性断裂及由其派生的高角度 NE 向剪裂隙。

4.1 NW 向剪切带控制矿床定位

二里河铅锌矿床、丝毛岭金矿、八卦庙金矿床都分布在二里河—长沟—八卦庙—空棺沟脆韧性剪切带上。从西到东, 即从二里河铅锌矿床→丝毛岭金矿→八卦庙金矿床, 脆韧性变形越来越强, 表现为石英脉数量的增加, 石英脉揉皱、拉断、透镜体化、糜棱岩化的增强。金矿化也越来越强(表 2)。受 NW 向剪切带的控制, 二里河铅锌矿床、丝毛岭金矿、八卦庙金矿床空间上从西到东成带分布。三者的主矿体都呈 NW 向平行展布, 八卦庙金矿矿体走向 135°, 倾向北东, 倾角 35~70°。NW 向剪切带控制了整个八卦庙矿区 NW 向矿体或矿带的空间展布, 是整个矿床的定位构造, 即导矿构造。这种控矿构造属于二里河—长沟—八卦庙剪切带的一部分, 同时也是早期矿化的容矿构造。虽然 NW 向石英脉品位不很高, 一般含金 $0.1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-6}$ 。但由于数量多、分布广, 因此也

是重要的金矿石。石英脉以韧性变形为主, 宽一般大于 15 cm, 延长大于 100 m, 脉带由一系列石英脉透镜体、无根石英脉、石香肠等组成, 石英脉中含大量铁碳酸盐矿物。

八卦庙金矿区的剪切带表现出更具韧性的特点。剪切带已不再像二里河铅锌矿剪切带那样是一完整的条带, 而是分解成了一系列次级的剪切细条带, 其间为低变形的透镜体^[12]。在剪切细条带中发育了从糜棱岩化绢云岩、绢英岩至糜棱岩、甚至超糜棱岩的一系列韧性剪切型岩石, 这类剪切型岩石是主要的赋矿岩石。其中的黄铁矿和磁黄铁矿化非常强烈, 剪切型岩石中发育了一系列剪切含金石英脉。千枚岩中的各种面理(如 S、C 面理及折劈) 相对地更富集黄铁矿或磁黄铁矿。

在显微镜下发现, 变形强烈的绢云母条带中的黄铁矿、磁黄铁矿含量明显高于弱变形的粉砂岩透镜体。因为在这些变形强烈的部位, 其扩容构造也相对发育, 有利于形成一种对金沉淀富集有利的物理化学微区, 所以容易形成相对的富矿区, 前面已经提到了各种面理中有相对较多的黄铁矿、磁黄铁矿发育, 这些显微构造可以视为最低一级的控矿构造。

4.2 NE 向叠加剪裂隙带控制富矿体

在二里河—长沟—八卦庙脆韧性剪切带的晚期发育了一些剪裂隙, 常切穿前者并常被石英脉充填, 与围岩界线明显, 边界平直, 并发育了角砾岩, 脉旁形成褪色蚀变带。这种石英脉一般较窄, 宽度一般在 1 cm 左右, 最宽可达 10 cm 以上, 长度不定, 可以在 1 m 以下或 5~7 m 以上。石英脉和蚀变岩中金品位高, 是重要的富矿石。这种石英脉反映晚期剪切带抬升进入近地表后岩石脆性变形的结果。在 NE 向叠加剪

表 2 剪切带内二里河铅锌矿、丝毛岭金矿点、八卦庙金矿石英脉及围岩微量元素含量

Table 2 Trace element compositions of quartz veins and country rocks in the Erlihe lead-zinc deposit, Simaoling gold occurrence and Baguimiao gold deposit in the brittle-ductile shear zone

矿区	岩石	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	As	Sb	Bi	Hg
八卦庙	围岩	35.55	0.11	29.94	29.53	127.13	19.88	47.52	19.7	2.25	0.48	0.03
	脆性变形期(II) NE 向切层石英脉	4173.8	3.58	21.67	26.11	74.56	10.28	21.11	467.8	6.39	10.2	0.08
	韧性变形期(I) NW 向顺层无根揉皱石英脉	1346.4	0.48	36.12	38.82	130.00	22.67	40.59	161.1	3.48	2.18	0.06
丝毛岭	脆性变形期(II) NE 向切层石英脉	1600.0	0.92	15.00	30.00	70.00	19.00	53.00	2030	15.00	2.00	0.05
	韧性变形期(I) NW 向顺层无根揉皱石英脉	80.63	0.14	46.30	22.00	251.33	17.60	49.67	785.1	4.43	0.98	0.05
	脆性变形期(II) NE 向切层石英脉	130.74	2.63	927.5	6013.5	8454.8	13.74	32.76	59.9	16.04	0.17	7.43
二里河	脆性变形期(I) NW 向顺层无根揉皱石英脉	47.0	6.54	152	175	1140.5	5.00	14.00	237.0	34.20	0.11	0.15
	微晶石英岩	16.93	2.03	1009	1167	506.67	15.0	21.33	64.3	13.30	0.12	0.40

注: Au: 10^{-9} , 其他: 10^{-6}

裂隙带形成富矿体。

4.3 剪切带变形岩石金含量

剪切带中NW向顺层无根揉皱石英脉含金平均 1.35×10^{-6} ,已高于部分含矿岩石,甚至在个别变质分异石英脉体中,金含量已 $>10 \times 10^{-6}$,连分布于石英细脉边部的黄铁矿含Au性也较高(表2)。丝毛岭地区剪切带中顺层无根揉皱石英脉含金 0.081×10^{-6} 。二里河铅锌矿微晶石英岩含金 16.93×10^{-9} ,而剪切带中含顺层石英脉的微晶石英岩含金为 47×10^{-9} 。这种石英脉总体顺层产出,与地层同步褶皱,呈各种弯曲塑性流变特征,与围岩界线不平直,但石英脉一般规模大,细小的石英脉一般平行层理分布,但石英多呈小扁豆状、透镜状压扁拉长。该石英脉代表早期的金矿化作用,Au含量一般在 1×10^{-6} 左右。

在脆性变形阶段叠加的NE向石英脉金含量较高,八卦庙金矿这种石英脉一般含金大于 4×10^{-6} ,丝毛岭金矿这种石英脉含金一般大于 1×10^{-6} ,二里河铅锌矿这种石英脉一般含金大于 0.1×10^{-6} 。

4.4 剪切带形成过程

剪切构造带是金矿化的主要控矿因素,凤太地区剪切带为华北板块和扬子板块碰撞造山所致的一系列挤压推覆的结果。

印支晚期在陆-陆碰撞过程中,由于南北向挤压和西坝岩体向西侵入,使八卦庙地区发生了局部的右旋剪切运动,前期南北向挤压应力场形成的同斜的背斜构造和雁状的向斜构造,在这次局部的右行剪切应力场作用下,不同岩性层之间产生了局部规模的右行走滑剪切,形成了凤太地区特殊的褶皱^[5]。剪切构造带产生的强大的热动力条件,不仅使泥盆系矿源岩中的成矿元素Au在应力集中地段产生活化、迁移,而且在剪切应力释放的区段沉淀,造成泥盆纪后第一次富集。

燕山早期,剪切带抬升进入浅层,叠加了脆形变形,形成了一系列平行的NE向张剪性节理密集带。西坝岩体再次侵入,由于岩浆热的影响,岩石中发生了强烈的褪色蚀变。同时早期形成已固结的层间流

表3 八卦庙金矿成矿期石英脉透射电镜测定分析结果
Table 3 Transmission electron microscope analysis of quartz veins of the Baguamiao gold deposit in the mineralization stage

石英脉	印支期韧性剪切变质热液期(I:早→晚)			燕山期岩浆热液改造期(II:早→晚)		
	NW向韧性剪切石英脉		NW向剪切-液致破裂石英脉	NE向剪裂石英脉		NE向缓倾脆性断裂石英脉
样号	Bg-21	Bg-25	Bg-4	Bg-56	Bg-30	Bg-33
	ρ ($1/cm^2$)	ρ ($1/cm^2$)	ρ ($1/cm^2$)	ρ ($1/cm^2$)	ρ ($1/cm^2$)	ρ ($1/cm^2$)
	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)
位错密度 ρ 和差应力 $\Delta\sigma$	3.7×10^8	4.4×10^8	4.4×10^8	6.5×10^8	4.3×10^8	4.6×10^8
	74.4	82.7	83.2	107.6	82.2	85
	4.9×10^8	3.2×10^8	3.6×10^8	8.8×10^8	5.8×10^8	3.1×10^8
	89.6	66.8	72.7	131.6	99.7	66
	5.7×10^8	4.2×10^8	3.1×10^8	4.7×10^8	6.4×10^8	3.3×10^8
	98.3	80.4	66	86.2	106.9	69
	6.0×10^8	4.7×10^8	4.7×10^8	6.0×10^8	6.4×10^8	3.9×10^8
	101.4	87.3	87.2	101.4	106	77
	4.7×10^8	7.7×10^8	4.8×10^8	6.3×10^8	3.3×10^8	2.9×10^8
	87.3	120.4	88.2	105.6	68	64
3.9×10^8	4.5×10^8	5.6×10^8	6.0×10^8	9.4×10^8	5.0×10^8	
76.8	83.9	97.8	102.5	137	90	
7.2×10^8	5.5×10^8	4.7×10^8	4.3×10^8	6.4×10^8	6.0×10^8	
114.6	96.1	87.2	81.6	106	102	
8.7×10^8	6.0×10^8	2.6×10^8	4.6×10^8	2.9×10^8	3.4×10^8	
129.8	101.4	58.9	85	63.7	71	
3.4×10^8	4.4×10^8	5.3×10^8	8.3×10^8	4.0×10^8	5.0×10^8	
70.7	82.7	94	126.1	78	90	
4.4×10^8	7.4×10^8	5.0×10^8	4.0×10^8	5.2×10^8	3.5×10^8	
82.7	117.5	90.2	78	93.1	72	
均值	5.3×10^8	5.2×10^8	4.4×10^8	5.9×10^8	5.4×10^8	4.1×10^8
	93.4	92.7	835	101.3	95.3	79
位错类型	线状自由位错, 树枝状位错	线状自由位错, 树枝状位错	线状及螺型, 自由位错, 树枝状位错	线状及螺型, 自由位错, 位错环及位错网	位错弓弯, 位错环位错网	线状自由位错, 树枝状位错, 螺型位错
亚晶边界位错类型		位错线, 位错壁		位错线		
流变特征	高应变速率中低温	高应变速率中低温	高应变速率低温	高应变速率中(低温)	高应变速率中(低温)	高应变速率中低温
Au(10^{-6})	0.03	1.0	3.1	8.2	0.88	0.06

褶曲石英网脉带破碎、角砾岩化等,均形成了构造应力释放空间,为成矿热液的充填沉淀提供了良好的场所。

综上所述,印支期北西向剪切构造带形成的动力分泌成矿热液,为金矿的初始改造富集条件,而燕山早期岩浆期后成矿热液为金矿化的主要富集条件。两期构造形成的交会结点为金矿化的容矿构造。

5 剪切带石英位错及差异应力

5.1 利用透射电镜方法观察石英位错亚构造

对采自八卦庙金矿不同成矿阶段的6件矿石样品进行透射电镜的超微构造研究。首先在普通薄片圈出拟测石英颗粒,加温后取出该石英颗粒并移至铜网上,用离子轰击器来减薄制成超薄薄片。镜下观察在国土资源部岩石圈构造与动力学开放研究实验室进行,测试在北京理化分析测试中心TEM室进行,所用仪器为H-700型透射电镜,工作电压200 kV,放大倍数1.8~2.4万倍。通过观察照像(每个样照10张透镜照片),获得了丰富的超微构造现象^[13]。分析表明,石英基本位错类型为刃型、螺型和混合型,组合形成以下几种位错亚构造(表3)。

(1)自由位错:自由位错是一些单个游离位错,在蠕变过程中尚未形成位错壁构造。石英自由位错多为刃型位错,其形态为长短不一的直线状(图3A),也有螺型自由位错(图3—B)及树枝状位错(图3—C)。自由位错分布不均一,不同样品自由位错密度不同,其中变形由强到弱,自由位错密度由大到小。

(2)位错弓弯和位错环:在剪应力作用下,当位错线的两端被“钉扎”而不能移动时,位错就会发生弯曲而形成弓弧状,即位错弓弯。弓弯进一步发展便形成位错环(图3—D)。

(3)位错网:为两组位错交织而成的网状位错(图3—E)。

(4)位错壁和亚晶粒构造:位错壁由一些平行位错线紧密排列而成(图3—F)。由位错壁围限而成的小区域被称之为亚晶粒。在所测样品中,常见亚晶粒呈菱形或凸镜体状。亚晶边界位错类型有长直线位错、位错壁等。

综上所述,成矿期石英位错亚构造以线位错为主,常见位错环、位错弓弯、树枝状位错,少见位错壁、位错网及亚颗粒等。而平直的线位错和位错缠结是位移滑移的结果,反映低温塑性变形;位错壁、亚

晶粒、位错环、位错网等是位错蠕变的结果,属高温塑性变形。从成矿早期到晚期,温度由高到低,位错构造类型随之发生变化。

5.2 剪切带差异应力

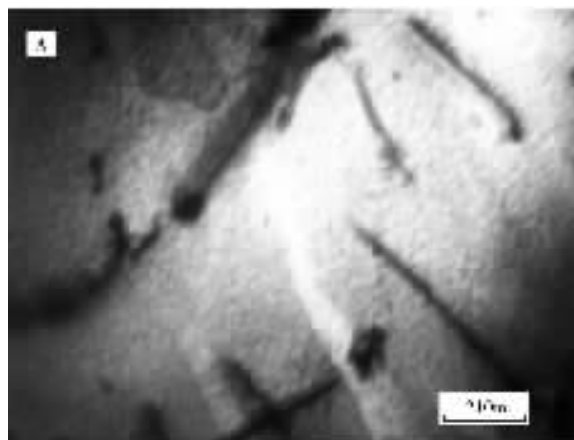
(1)自由位错密度与差异流动应力:笔者采用McCormick(1977)公式: $\Delta\sigma=164\times 10^{-4}\times\rho^{0.66}$ 来计算差异流动应力大小^[14],式中 ρ 为自由位错密度,统计方法采用厚度—线条法,即 $\rho=2N/(L\cdot t)$,其中 L 为标绘直线总长度(cm), t 为薄片厚度,经离子减薄后 $t=5\times 10^{-5}$ cm, N 为直线与位错交点数。自由位错密度统计由计算机完成,将自由位错密度值代入McCormick公式,即得出各成矿阶段构造活动的差异流动应力值大小(表3)。由表3可见同一样品不同照片所统计的差异应力值不同,但从平均值可以看出,从成矿早期到晚期差异应力值逐渐变小,其变化范围为63.7~137 MPa。

(2)剪切变形的应变速率:温度和差异应力确定之后,可利用岩石高温流变律 $\dot{\epsilon}=A\exp[-H/RT]\sigma^n$,计算剪切应变速率^[14]。式中 $\dot{\epsilon}$ 为应变速率(s^{-1}), R 为气体常数($8.314J\cdot K^{-1}\cdot mol^{-1}$), T 为热力学温度(K), σ 为差异应力。按照Shelton和Tulins(1981)所提供的石英岩的有关参数, A 取 1.26×10^{-3} ($MPa\cdot n^{-1}\cdot s^{-1}$), H 取 168×10^3 ($J\cdot K^{-1}\cdot mol^{-1}$), n 取2.0。通过将不同成矿阶段的差异应力值及温度值代入应变速率公式,得到成矿期构造活动变形的应变速率为 $9.96\times 10^{-14}\sim 1.26\times 10^{-12}S^{-1}$ 。

6 剪切成矿动力学机制

综上所述,石英位错有刃型位错、螺型自由位错及树枝状位错(图3)。有位错弓弯、位错环、位错列、位错链、位错网、位错壁和亚晶粒构造,从早到晚,石英位错由复杂到简单。对应的构造活动和成矿阶段是:印支期剪切动力变质热液期(I NW向脆韧性剪切带石英脉)→燕山期岩浆热改造期(NW向液相致裂石英脉→NE向剪裂石英脉Ⅱ)→晚期热液期(Ⅲ向缓倾脆性断裂石英脉)。

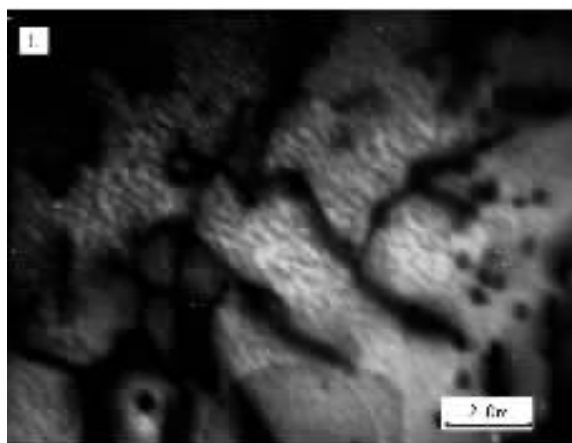
图4和5所示剪切构造动力演化及对矿化的控制表现为:从成矿阶段早期到晚期,位错密度和差应力值总体呈下降趋势,这与矿区成矿构造的演化从脆韧性-脆性的情况相一致,每一期构造活动都是从早到晚 $\Delta\sigma$ 值降低,反映前者为构造应力强烈期,后者则为亚稳定期,在NE向与NWW向构造重合期,



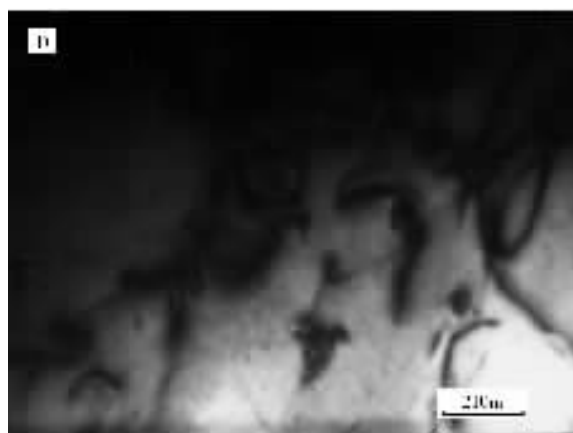
A. Bg-21, 石英位错, 直线状自由位错, 亚晶边界为位错线。



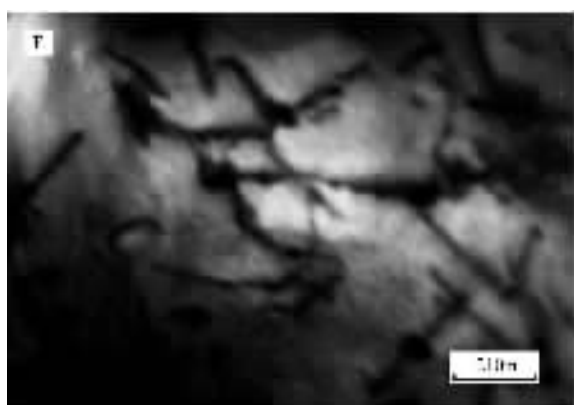
B. Bg-25, 石英位错, 螺型位错。



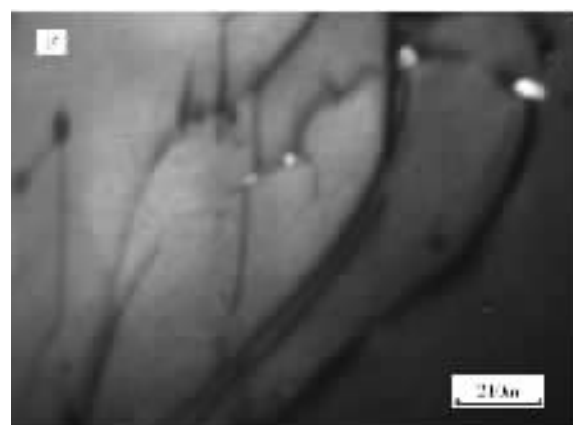
C. Bg-30, 石英树枝状位错。



D. Bg-25, 石英位错, 位错环, 位错弓弯。



E. Bg-30, 石英位错, 位错网。



F. Bg-21, 石英位错, 亚晶边界为位错壁。

图3 八卦庙金矿石英位错类型

Fig. 3 Types of quartz dislocation of the Baguamiao gold deposit

即第一次构造-热液脉动式活动的晚期和第二期构造-热液脉动式活动的初期, 两次构造的叠加是成矿的有利时期。即活动亚稳定期有利于形成富矿

石; 每个亚阶段差异应力值表现为高低明显变化的脉动性, 同时总体演化曲线也表现出一定的脉动性或称之为应力周期^[5]。如图5所示, 印支晚期形成

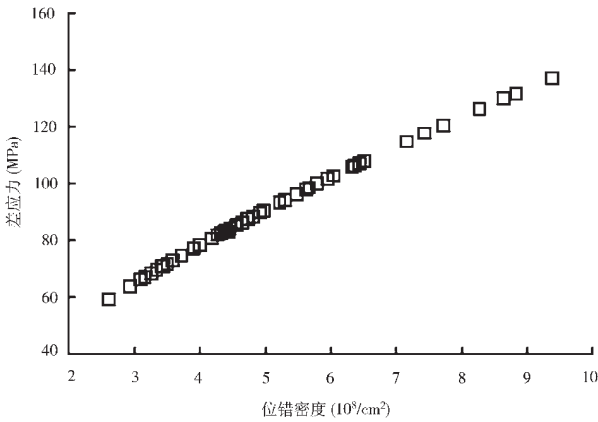


图4 八卦庙金矿成矿-构造演化差应力-位错密度图
Fig. 4 Differential stress-dislocation density diagram of the Baguamiao gold deposit

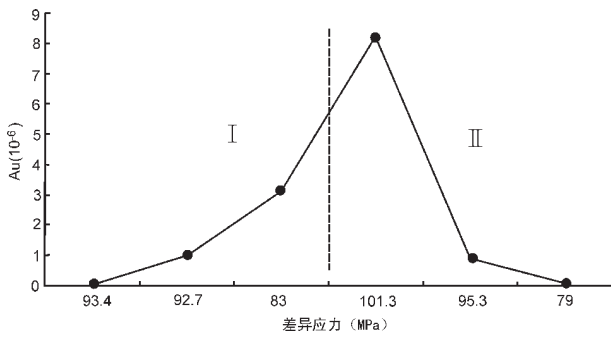


图5 主构造活动期Au-差异应力关系演化图
Fig. 5 Au content-differential stress evolution diagram of the Baguamiao gold deposit
金富集于第一次构造活动(I)的晚期和第二次构造活动(II)的初期,两次脉动式构造活动应力周期应力泵成矿机制

的NW向石英脉从早期到晚期Au含量逐渐增高,燕山早期形成的NE向石英脉从早期到晚期Au含量逐渐降低。印支晚期和燕山早期是本区金矿成矿的高峰期,即是脆韧性构造变形向脆性变形的转换期,也是NW向构造与NE向构造的复合叠加期。正是这种应力周期形成的“应力泵”或“地震泵”作用成为金矿的形成机制^[16-18]。

本文是笔者博士论文的部分内容,在论文编写

过程中始终得到北京大学地质系曾贻善老师的精心指导,在野外样品采集中得到了马治国高级工程师的密切配合和支持,在此表示感谢。

参考文献:

[1] 张复新.南秦岭微细浸染型金矿床地质与找矿[M].西安:西北大学出版社,1997.
 [2] 张复新.秦岭浸染状金矿床与热水沉积铅锌矿床地质地球化学共生富集关系[J].西北地质,1996,17(2):13~17.
 [3] 郭健.陕西凤县八卦庙金矿床控矿条件分析及找矿方向[J].西北金属矿产地质,1992.
 [4] 方维萱.八卦庙超大型金矿床构造-矿物-地球化学[J].矿物学报,2000,20(2):121~127.
 [5] 王相,等.秦岭造山与金属成矿[M],北京:冶金工业出版社,1996.
 [6] 韦龙明.八卦庙金矿床石英脉与金矿化关系再研究[J].地质找矿论丛,1998,13(3):9~14.
 [7] 桑海清,王松山,胡世玲,等.石英的⁴⁰Ar/³⁹Ar定年方法及Ar同位素质谱分析[J].质谱学报,1994,15(2):17~27.
 [8] Lanphere M, Dalrymple G B. Identification of excess ⁴⁰Ar by ⁴⁰Ar-³⁹Ar age spectrum technique[J]. Earth Planet. Sci. Lett. 1976, 32 :141~148.
 [9] Dalrymple G B, Lanphere M A. ⁴⁰Ar-³⁹Ar technique of K/Ar dating: A comparison with the conventional[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1971, 12 : 300~308.
 [10] Fleck R J et al. Interpretation of discordant ⁴⁰Ar/³⁹Ar age spectra of Mesozoic tholeiites from Antarctica. Geochim[J]. Cosmochim. Acta. 1977, 41, 15~32.
 [11] 邵世才,汪东波.南秦岭三个金矿床的Ar-Ar年龄及其地质意义[J].地质学报,2001,75(1):106~110.
 [12] 刘瑞珣.显微构造地质学[M].北京:北京大学出版社,1988.
 [13] 张连昌.韧性剪切带动力学特征及其控矿作用研究进展[J].地质与勘探,1999,35(2):10~13.
 [14] 万天丰.古构造应力场[M].北京:地质出版社,1988,1~144.
 [15] 张连昌,曾章仁,杨兴科,等.康古尔韧性剪切带型金矿构造地球化学特征[J].贵金属地质,1997,4(1):13~20.
 [16] 卢焕章.剪切带中流体地球化学特征及其找矿意义[J].桂林工学院学报,1995,15(1).
 [17] Sibson R H, Robert F. High-angle reverse faults fluid pressure cycling and mesothermal gold-quartz deposit[J]. Geology. 1988, 16 :551~555.
 [18] Sibson R H. Earthquake faulting as a structural process[J]. J. Struc. Geol. 1989, 11 :1~14.

Baguamiao superlarge gold deposit in the Qinling orogen : the characteristics of its control by the brittle-ductile shear zone and dynamic mechanism for ore-forming structure

FENG Jian-zhong , SHAO Shi-cai , WANG Dong-bo , WANG Xue-ming , MA Zhi-guo

(1.Beijing Institute of Geology for Mineral Resources , Beijing , 100012 , China

2.Baguamiao Gold Mine , Fengxian 721700 , Shaanxi , China)

Abstract : The Baguamiao gold deposit is the only superlarge gold deposit in the Qinling orogen. It was once considered to be a sediment-hosted finely disseminated gold deposit (Carlin type) But the latest study shows that it is characterized by gold-bearing quartz veins with visible and coarse-grained gold. Its spatial location and distribution of orebodies are controlled by the Erlihe-Changgou-Baguamiao-Kongguangou brittle-ductile shear zone and the rocks in the deposit show distinct features of shear deformation. During brittle-ductile shearing , NW-trending , rootless , corrugated , bedding-parallel quartz veins were formed. The Au-bearing quartz veins , which have an Ar-Ar plateau age of 232.58 ± 1.59 Ma and an Ar-Ar isochron age of 222.14 ± 3.45 Ma , are the product of Indosinian brittle-ductile shearing-dynamic metamorphism and differentiation. In the Early Yanshanian , the ductile shear zone was uplifted to the shallow level and reworked by brittle deformation , thus enabling the NE-trending Au-bearing quartz veins to be formed under the action of hydrothermal fluids. Such Au-bearing quartz veins are rich ores and contain $1 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$ Au. The strong brittle-ductile shear deformation records that the quartz dislocation and differential stress ($\Delta\sigma$) had an evolutionary trend of becoming small from the early to late phases. The $\Delta\sigma$ values tended to decrease toward the end for the shearing event and brittle deformation event. Mineralization took place during the metastable stages of tectonic activity in the periods of alternate occurrence of two pulsations of tectonic events. The " stress pump " or " shock pump " formed in the stress periods was the dynamic mechanism for the formation of the Baguamiao superlarge gold deposit.

Key words : Qinling orogen ; Baguamiao gold deposit ; brittle-ductile shear zone ; stress pump ; dynamic mechanism for mineralization