

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

韧性剪切构造成岩成矿作用及对金矿化的控制

——以内蒙古武川县后石花金矿为例

贾国志 梁海军

武警黄金第一总队, 哈尔滨, 150086

内容提要 本文以内蒙古中部后石花金矿为例, 简述了“韧性剪切构造成岩成矿作用”的新观点。研究表明, 韧性剪切成岩过程包括细粒化作用、热流体作用、酸碱交代作用; 韧性剪切带这种深层次断裂构造形成过程中, 其推覆演化是逐渐减压过程, 降压效应和剪切带本身的膨胀渗透作用, 引起了剪切带内部积累的能量梯度(压力、温度、物质), 导致弥漫于大面积围岩中和下地壳的液体进入韧性剪切带中。“节流阀”作用形成韧性剪切成岩成矿热液系统。韧性剪切构造对金矿的控制核心是成岩成矿为统一的热动力系统, 早期以成岩为主, 中晚期以蚀变和矿化为主。

关键词 韧性剪切 构造成岩成矿 金矿化控制 内蒙古中部

韧性剪切带与金矿床的空间关系早已被证实, 加拿大地质学家在魁北克和安大略省的Abitibi绿岩带中发现了具有工业意义的金矿床的控矿构造为韧性剪切带, 博伊尔(1984)提出了韧性剪切带型金矿床的概念, 认为其成矿机制和控矿因素都与韧性剪切带有关。Colvin等(1986)系统研究了Abitibi绿岩带金矿床形成的构造环境, 根据此区金矿床野外观察资料提出了变形状态随深度而变化的理想矿带的垂直分带模式。在西澳Yilgarn的Leonora地区, Williams(1989)研究了剪切带金矿化和构造史之间的关系, 证实了产于韧性剪切带的含金石英脉与韧性剪切带的成因联系。

近年来, 中国学者对韧性剪切构造带的构造地质学和韧性剪切带的成岩作用(汤家富等, 1987; 翟淳, 1988; 钟增球等, 1990, 1996; 韩志勇等, 1995; 陈文寄等, 1996; 王志洪等, 1996; 张建新等, 1998; 许志琴等, 1999; 周建波等, 1999)、韧性剪切带型金矿、韧性剪切与金成矿的关系(杨开庆, 1982; 季峻峰等, 1994; 刘继顺, 1996; 王玉明, 1998)等进行了大量的研究。杨开庆(1982)从构造动力成岩成矿作用的观点出发, 致力于构造动力与成岩成矿作用的关系以及构造动力在成岩成矿过程中引起的同步地球化学作用, 把这种与剪切带有关的成矿作用称之为构造动力成矿作用(Tectono-Metallogenesis)。王玉明(1998)认为是剪切作用过程中石英的压电性导致了金的沉淀富集。陈柏林等(1999)从韧性剪切带成矿特征、演化与金矿化类型的叠加和金矿床特征入手, 将韧性剪切变形层次与金成矿元素活化、分异、聚集和成矿作用阶段结合起来进行分析, 认为韧性剪切带的成生、造山带的演化与金矿床具有密切的关系, 而且正是构造变形时空演化特点决定了不同类型金矿化(如石英脉型、构造蚀变岩型、蚀变糜棱岩型)的有机组合, 构成大型、特大型金矿床。 全

笔者研究了内蒙古武川县后石花金矿床的北全一打不亥韧性剪切带的地质特征、剪切带微观组构及宏观展布、剪切带对金矿化的控制、剪切带中常量及微量元素的分布、分配及构造

剪切动力变异作用对元素的控制、剪切带中围岩的蚀变作用及石英脉形成,研究了剪切带成矿流体包裹体,获得了成矿热液的动力状态和金矿硫同位素及氢氧同位素资料。

依据上述研究,笔者认为韧性剪切构造作用是一种构造成岩(形成糜棱岩类岩石)—成矿(形成蚀变糜棱岩型金矿及石英脉型金矿)的综合作用,无论是成岩还是成矿,其实现过程都是通过化学成分和矿物成分的再分配和再分布,物质组构的重新排列和组合而实现的。同时,笔者强调了韧性剪切动力成矿热液系统的作用。

1 大地构造、韧性剪切带和金矿空间分布

内蒙古中西部的大地构造格局(图1)是华北地台太古宙原始大陆、古元古代地块,中元古代渣尔泰和白云鄂博裂谷带、早古生代弧—沟系和晚华力西期褶皱带共存(王辑等,1989)。但是,有人认为研究区北侧的白云鄂博群不是元古宙,而是古生代的地层(张鹏远等,1993;乔秀夫等,1997),作为白云鄂博裂谷主要证据之一的白云鄂博矿床赋矿白云岩也已有许多人认为它并不是火山岩,而是沉积岩(张鹏远等,1993)或微晶丘(乔秀夫等,1997;章雨旭等,1998;刘淑春等,1999)。后石花金矿床位于太古宙原始大陆、古元古代地块和渣尔泰裂谷三大构造单元交接处的古元古代地块边缘。矿床赋存的韧性剪切带是内蒙古中段的北部色尔腾山卵型构造与南部乌拉山孔兹岩系线性构造的分界。该区地壳模式和地壳密度模式:从上地壳到下地壳地

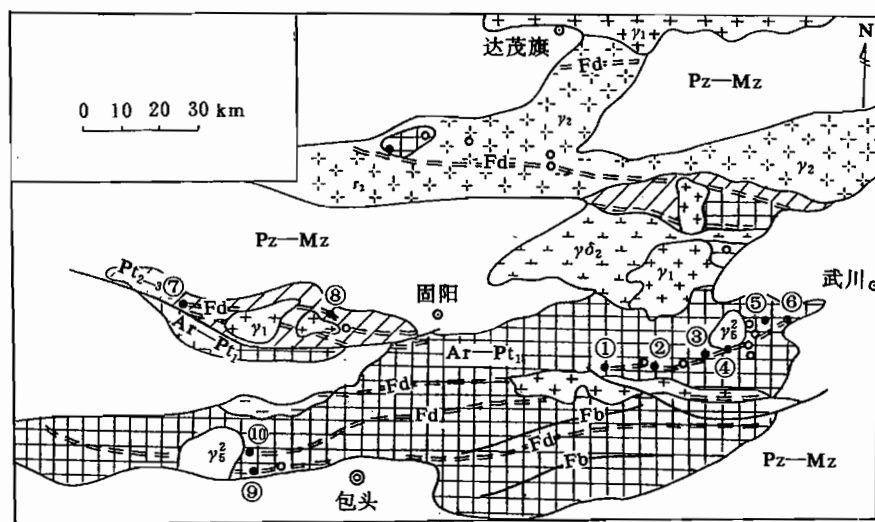


图1 内蒙古中部地区韧性剪切带及金矿床分布示意图

Fig. 1 Schematic map of the ductile zones and gold deposits in the middle part of Inner Mongolia

Pz—Mz—古生界—中生界;Pt₂₋₃—中元古界—新元古界;Ar—Pt₁—太古宇—古元古界高级变质岩;γ₂²—燕山期钾长花岗岩;γ₁—古元古代花岗岩;γ_{δ₂}²—新元古代石英闪长岩;γ₂²—新元古代花岗岩;Fd—韧性剪切带;Fb—主要脆性断裂;●—金矿床;○—金矿点;①—腮忽洞金矿点;②—仁字号金矿点;③—后石花金矿床;④—乱察沟金矿床;⑤—松树背金矿床;⑥—东伙房金矿点;⑦—十八顷壕金矿床;⑧—老羊壕金矿点;⑨—哈达门沟金矿床;⑩—柳坝沟金矿床
Pz—Mz—Paleozoic—Mesozoic;Pt₂₋₃—Mesoproterozoic—Neoproterozoic; Ar—Pt₁—Archean—Paleoproterozoic high-grad metamorphic rocks; γ₂²—Yanshanian moyite; γ₁—Paleoproterozoic granite; γ_{δ₂}²—Neoproterozoic quartz diorite; γ₂²—Neoproterozoic granite; Fd—ductile zone; Fb—main brittle fault; ●—gold deposit; ○—gold occurrence; ①—Saihuodong occurrence; ②—Renzhihao occurrence; ③—Houshuhua deposit; ④—Luanchagou deposit; ⑤—Songshubei deposit; ⑥—Donghuofang occurrence; ⑦—Shibaqinghao deposit; ⑧—Laoyanghao occurrence; ⑨—Hadamengou deposit; ⑩—Liubagou deposit

震波纵波速度为 5.2~6.8km/s,密度为 2.4g/cm³;重力均处于高异常与低异常转换部位,重力布格梯度为 $2.5 \times 10^{-5}(\text{m/s}^2) \cdot \text{km}$ 。莫霍面等深线近东西向展布,有明显的梯级带。莫霍面从和林格尔—呼和浩特—武川—白兰花深度由 39 km 下降至 42 km。

根据李树勋等(1990)的研究,韧性剪切带是该区元古宙地层的主要构造变形。区域韧性剪切带近东西向展布,绝大多数金矿床与其有空间一致性,已发现有后石花、松树背、乱察沟、东伙房、腮忽洞、十八倾壕、老羊壕等十余处金矿床(图 1、图 2)。后石花金矿床产于纳令沟—公义明—十八倾壕韧性剪切带东段。

2 韧性剪切带特征

内蒙古中西部有 6 条近东西向展布的韧性剪切带,宽度几米至两千米,长度达数百千米。纳令沟—公义明—十八倾壕韧性剪切带由强应变形成的糜棱片岩、超糜棱片岩、超糜棱岩、糜棱岩带,和弱应变形成的糜棱岩化片岩、斜长角闪岩带和斜长角闪岩、角闪岩残块组成。具下述特征(图版 I):① 剪切带局部由若干条强应变带和弱应变带构成,具有分划性不连续面,体现了韧—脆性剪切断裂的特征;② 发育两种叶理:糜棱叶理和流劈理;③ 发育 a 型褶皱或鞘褶皱;④ 早期角闪岩脉具拖尾;⑤ 形成云母鱼或不协调褶曲;⑥ 糜棱岩中长石残斑晶有显微破

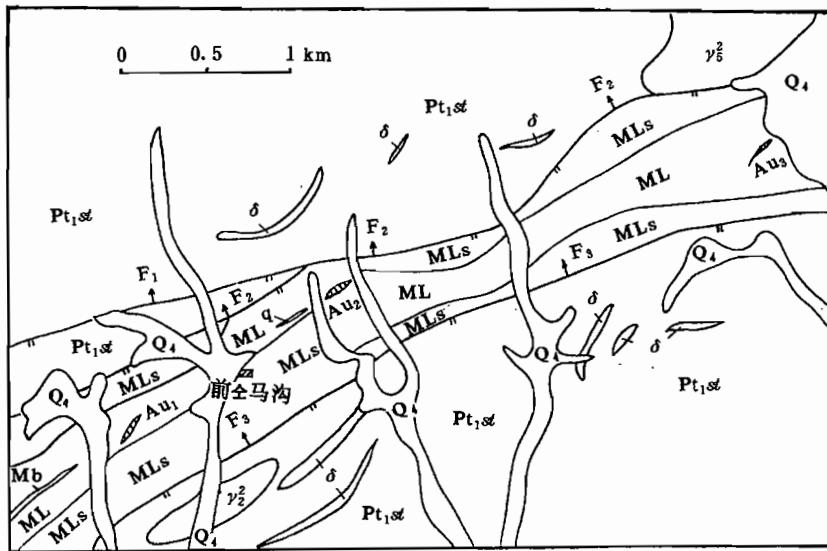


图 2 内蒙古武川县后石花金矿区地质简图

Fig. 2 Geological Sketch of the Houshihua gold deposit in Wuchuan County, Inner Mongolia

Q₄—全新统洪积、残坡积砾石夹腐植土;Pt_{1st}—古元古界色尔腾山群斜长角闪岩、片麻状角闪质混合岩、绿泥片岩;γ₂¹—兴凯期黑云斜长花岗岩;γ₂²—燕山期中粒钾长花岗岩;δ—闪长岩脉;ML—糜棱片岩、超糜棱岩、糜棱岩;MLs—糜棱岩化片岩和糜棱岩化斜长角闪岩,具斜长角闪岩和角闪岩残块;Mb—糜棱岩化大理岩;F₁—逆断层及断层编号;q—石英脉;Au₁—矿体及编号

Q₄—Holocene eluvial gravel with humic soil;Pt_{1st}—plagioclase amphibolite, gneissoid amphibolitic migmatite and chlorite schist of Paleoproterozoic Seertengshan Group; γ₂¹—Xingkaian (Neoproterozoic) biotite plagiogranite; γ₂²—Yanshanian mesogained moyite; δ—diorite dyke; ML—milonite schist, ultra-milonite and milonite; MLs—milonitized schist and plagioclase amphibolite with blocks of plagioclase amphibolite and amphibolite; Mb—milonitized marble; F₁—reversed fault and its No.; q—quartz vein; Au₁—gold orebody and its No.

裂组构,如石英亚颗粒、波状消光、菱形变形纹、方解石斜长石双晶、旋转扭曲。受原岩成分制约,形成了长英质糜棱岩、斜长角闪质糜棱岩和碳酸盐质糜棱岩,发育折劈理系。

根据糜棱叶理(Sc)与剪切带面理(Ss)夹角为 $8^{\circ}\sim 22^{\circ}$ 计算,剪切应变值 $\nu=2.07\sim 6.97$,平均3.46,总位移量大于1000m。糜棱岩石英颗粒气液包裹体均一温度(10个测点平均)为 303°C ,压力为 $0.26\sim 0.51\text{GPa}$ 。剪切带倾向上为自北向南推覆剪切,走向上为右行剪切。

3 金矿床地质特征

(1) 后石花金矿化为蚀变糜棱岩型和含金石英脉型,均产于糜棱岩或糜棱片岩中,矿体为脉状或透镜状,厚度 $0.25\sim 15\text{m}$,平均品位 $6.93\times 10^{-6}\sim 7.70\times 10^{-6}$,平均厚度 $1.51\sim 2.63\text{m}$,矿体上盘为糜棱岩化大理岩或碳酸盐质糜棱岩。

(2) 金矿床的化学成分:含Ag较低、 $\text{C}<0.54\%$ 、 SiO_2 84.51%、TFe 2.20%、 Al_2O_3 3.178%、S 0.34%。金主要以碲金矿、碲金银矿、叶碲金银矿及自然金形式存在。脉石矿物为石英、粘土矿物、绢云母、绿泥石、长石、方解石、铁白云石等。黄铁矿、黄铜矿和石英等脉石矿物内部裂隙金占45.0%、间隙金占36.13%、石英等脉石包体金16.13%。黄铁矿和黄铜矿包体金仅占2.72%。自然金 $0.74\sim 0.05\text{mm}$ 级粒度占84.62%。

(3) 矿物标型:石英热发光曲线具有单峰型、双峰型和三峰型。黄铁矿热电系数导型N型占主导地位。

(4) 矿化阶段:通过野外观察热液蚀变矿物相互关系特征,结合室内光薄片研究将矿化阶段分为6个阶段。早期:I绢英岩化和II黄铁矿—石英—钾长石阶段;主成矿期:III辉钼矿—石英和IV多金属—石英阶段;晚期:V黄铁矿—石英—铁白云石和VI黄铁矿—铁白云石阶段。

(5) 围岩蚀变:钾长石化面形蚀变。黄铁矿化、绢云母化、碳酸盐化、绿泥石化、硅化,绿泥石化呈不对称带状分布。近矿围岩蚀变为硅化、绢云母化和铁白云石化。

4 韧性剪切带地球化学和成岩成矿

4.1 常量元素地球化学和成岩

来自剪切带内的16件硅酸盐样品分析数据显示: SiO_2 、 Na_2O 从剪切带边缘的角闪岩至中心的糜棱岩逐渐有较大幅度增加, K_2O 以较小的幅度增加; MgO 、 TiO_2 、TFe逐渐降低;碳酸盐质糜棱岩组分受应变强弱控制明显。表明:①糜棱岩化过程中,物质组分的变异受原岩成分和应变强弱双重控制;②即使在剪切带内部,原岩成分相同,组分的变异也受应变强弱制约;③组分的变异,不单是变质反应,较重要的是动力剪切作用的物理迁移过程中Si—O四面体没有变化,这为野外所见“鞍状”石英脉和不对称小褶曲显示的“硅迁移”证实。因此,笔者认为韧性剪切构造作用引起的成分变异最终导致矿物及化学成分的组成变化和物质组构的重新排列组合,形成新的岩石类型——糜棱岩类。

4.2 微量元素地球化学及成矿

为了探讨韧性剪切造成岩成矿作用过程微量元素的变化特征,采样过程中,糜棱岩化岩石避开矿化蚀变叠加部位;变质带原岩均采自剪切带以外;矿体样品以地表槽探控制的矿体为主,个别采自坑道;石英脉根据变形特征严格区分其与矿化先后关系而确定其代表性,从而基本上分开了矿化蚀变和变质变形引起的组分变化。从采自矿区的184件样品中通过细致的薄片研究筛选了50件进行了准确的定名和矿物研究(表1),定量分析了Au、As、Sb、Bi、Te、W、

Mo 的含量,半定量分析了 Cu、Pb、Zn、Sn、Ni、Co、Cr、V、Ga、Ti 的含量。表明:① 韧性剪切带外部岩石上述元素的丰度高于内蒙古中部乌拉山群、色尔腾山群和二道洼群地层的区域丰度值,又低于大陆壳丰度值;② 韧性剪切带绿泥片岩→绢云片岩→糜棱岩→蚀变岩型矿体 Au、Ag、As、Cu、Mo、W、Sn 等元素的平均值(\bar{x})、离差(S)、变化系数(S/\bar{x})、与地壳平均含量的比值(KK)逐渐增大,而 Pb、Zn、Ni、Co、Cr、V、Ga、Ti 等元素上述特征值逐渐减少;③ 韧性剪切带的各类脉状岩石,蛇纹石化橄榄岩→角闪石岩→早期无矿石英脉→长英质脉岩→矿化石英脉→矿体, Au、Ag、Cu、Mo 等各特征值增高;Ni、Co、Cr 则下降;④ 剪切带外部岩石→绿泥片岩(绢云片岩)→糜棱岩化岩石→糜棱岩 Au 的 KK 值由 44%→47%→84%→329%→1211%, Cu 由 70%→129%→133%→155%→160%, Mo 由 176%→146%→189%→490%, 显示韧性剪切过程中金、铜、钼是逐渐富集的。剪切带中无矿石英脉→长英质脉岩→矿化石英脉 Au 的浓集克拉克值由 161%→284%→2707%, Ag 由 43%→43%→1330%, Cu 由 31%→202%→1420%。表明 SiO_2 的分异演化伴随金、铜等元素的富集。⑤ 蚀变糜棱岩型和石英脉型矿体 Au 的 KK 值为 277.16 和 8226.79, Ag 为 9.84 和 222.42, Cu 为 2.92 和 0.64, Pb 为 1.07 和 5.38, As 为 <45.5, Sn 为 <5.88, Mo 为 9.82 和 33.03, Ni 为 2.74 和 0.22, Co 为 2.17 和 0.53, Cr 为 5.00 和 3.08, V 为 1.99 和 0.11, Ga 为 2.84 和 0.12, Ti 为 0.24 和 0.02。表明韧性剪切构造作用过程中 SiO_2 的分异和成矿元素的分异有明显的一致性。

4.3 矿物包裹体地球化学及成矿

包裹体类别:① 含液体和气泡的两相包裹体;② 含 L_{H_2O} 、 L_{CO_2} (液相水、液相 CO_2) (或 L_{CH_4})

表 1 后石花含金韧性剪切带不同岩石微量元素统计表

Table 1 Contents of some trace elements in Houshuhua auriferous ductile shear zones

元素	特征值	石英脉 矿石 (12 件)	矿化 石英脉 (30 件)	无矿 石英脉 (4 件)	蚀变岩 矿石 (9 件)	糜棱岩 (18 件)	糜棱岩 化片岩 (37 件)	绿泥 片岩 (33 件)	绢云 片岩 (24 件)	长英质 脉岩 (3 件)	角闪岩— 斜长角闪 岩(7 件)	混合岩— 片麻岩 (4 件)	橄辉岩脉 (3 件)
Au	\bar{x}	27971.1	92.05	5.48	942.33	41.19	11.19	1.59	2.86	9.67	1.94	1.97	1.47
	S	3002.4	64.5	8.5	684.85	55.3	27.04	1.83	3.35	6.67	1.43	1.11	1.53
	S/\bar{x}	0.12	0.7	1.55	0.73	1.35	2.42	1.15	1.17	0.69	0.74	0.56	1.04
	KK	8226.79	27.07	1.61	277.16	12.11	3.29	0.47	0.84	2.84	0.49	0.49	0.43
Ag	\bar{x}	15.57	0.934	0.03	0.689	0.023	0.064	0.036	0.03	0.03	0.05	0.038	1.71
	S	23.64	1.703	0	0.42	0.023	2.68	0.004	0	0	0.04	0.035	2.85
	S/\bar{x}	1.52	1.82	0	0.61	1	41.88	0.11	0	0	0.8	0.92	0.82
	KK	222.42	13.3	0.43	9.84	0.33	0.91	0.51	0.43	0.43	0.63	0.48	27.42
Cu	\bar{x}	34.65	76.83	17	157.8	83.9	86.4	69.76	72	109.3	34.8	47.5	21
	S	588.18	183.97	10.13	130.8	45.4	122.3	37.8	43.4	96.4	6.37	45.96	25.4
	S/\bar{x}	16.97	2.39	0.6	0.83	0.54	1.42	0.54	0.6	0.88	0.18	0.97	1.21
	KK	0.64	1.42	0.31	2.92	1.55	1.6	1.29	1.33	2.02	0.55	0.75	0.39
Pb	\bar{x}	69.96	15.81	45	13.89	28.3	32.57	32.56	67.8	40	21.1	35	21
	S	59.86	29.4	70	2.2	16.18	12.68	16.52	119.4	17.3	1.91	7.07	25.4
	S/\bar{x}	0.86	1.86	1.56	0.16	0.57	0.39	0.51	1.76	0.43	0.09	0.2	1.21
	KK	5.38	1.22	3.46	1.07	2.78	2.51	2.5	5.22	3.08	1.76	2.92	1.62
As	\bar{x}	<100	2.35	0.58	<100	2.39	0.92	0.73	0.92	0.8	1.82	1.875	5.36
	S	<100	1.65	0.096		2.61	1.18	0.29	0.6	0.52	2.41	1.52	5.22
	S/\bar{x}		0.7	0.17		1.09	1.28	0.4	0.65	0.65	1.32	0.81	0.97
	KK	<45.5	1.07	0.26	<45.5	1.09	0.42	0.33	0.42	0.36	0.83	0.85	2.44

(续表1)

元素	特征值	石英脉 矿石 (12件)	矿化 石英脉 (30件)	无矿 石英脉 (4件)	蚀变岩 矿石 (9件)	糜棱岩 (18件)	糜棱岩 化片岩 (37件)	绿泥 片岩 (33件)	绢云 片岩 (24件)	长英质 脉岩 (3件)	角闪岩— 斜长角闪 岩(7件)	混合岩— 片麻岩 (4件)	橄辉岩脉 (3件)
W	\bar{x}			0.68		2.94	1.17	1.12	0.76	<0.5			<0.5
	S			0.64		5.83	1.2	0.97	1.01				
	S/ \bar{x}			0.94		1.98	1.03	0.87	1.33				
	KK			0.62		2.67	1.06	1.02	0.69	<0.45			<0.45
Sn	\bar{x}	<10		3	<10	4.2	6.7	3.87	37	4.3	2.77	3	3.7
	S			0		1.86	17.1	0.57	1.6	2	0.68	2.12	3.1
	S/ \bar{x}			0		0.44	2.55	0.15	0.04	0.47	0.25	0.71	0.84
	KK	<5.88		1.76	<5.88	2.47	3.94	2.28	21.76	2.53	1.63	1.76	1.82
Mo	\bar{x}	39.64	6.99	0.98	11.78	5.88	2.2	1.75	2.11	1	1.43	9.98	1.63
	S	32.2	5.56	0.05	11.11	8.09	1.4	0.72	3.32	0	0.75	6.4	0.64
	S/ \bar{x}	0.81	0.8	0.05	0.94	1.38	0.64	0.41	1.57	0	0.25	0.64	0.39
	KK	33.03	5.83	0.82	9.82	4.9	1.83	1.46	1.76	0.83	1.1	7.68	1.37
Ni	\bar{x}	15.91		1.95	194.4	19.9	111.4	36.7	31.87	20.3	29.44	9.5	1056.7
	S	8.61		2.03	30	21.7	495.8	33.6	101.06	19.5	23.83	4.24	1683
	S/ \bar{x}	0.54		1.04	0.15	1.09	4.45	0.92	3.17	0.96	0.81	0.45	1.59
	KK	0.22		0.33	2.74	0.28	1.57	0.52	0.45	0.29	0.33	0.11	14.88
Co	\bar{x}	10.45		5.25	43.3	30.2	36.6	55.3	28.5	16.7	29.9	21.25	53.3
	S	1.51		3.3	13	24.6	19.6	16.8	21.5	20.3	28.63	12.37	83.9
	S/ \bar{x}	0.14		0.63	0.3	0.81	0.54	0.3	0.75	1.22	0.96	0.58	1.57
	KK	0.53		0.26	2.17	1.51	1.83	2.77	1.43	0.84	1.2	0.85	2.67
Cr	\bar{x}	277.27		97.5	450	172.2	200	181.1	282.5	46.3	91.13	27.5	609.7
	S	46.71		136	247.5	160.4	238.4	176.1	273.3	47.6	94.81	3.54	782.9
	S/ \bar{x}	0.17		1.39	0.55	0.93	1.19	0.97	0.97	1.03	1.04	0.13	1.28
	KK	3.08		1.08	5	1.91	2.22	2.01	3.14	0.51	0.83	0.25	8.7
V	\bar{x}	13.37		6.5	238.9	191.7	221.2	169	177.1	40	97.1	106.05	31
	S	15.2		3.1	82.1	177.2	178.8	169.4	183.9	34.6	91.48	90.01	34.8
	S/ \bar{x}	1.14		0.48	0.34	0.92	0.81	1	1.04	0.87	0.94	0.85	1.12
	KK	0.11		0.05	1.99	1.6	1.84	1.41	1.48	0.33	0.69	0.76	0.26
Ga	\bar{x}	2.18		<10	51.1	14.1	13.8	<10	<10	<10	22.7	1.5	<10
	S	0.81			24.6	19.7	16.3				23.7	0.7	
	S/ \bar{x}	0.37			0.48	1.4	1.18				1.04	0.47	
	KK	0.12		<0.56	2.84	0.78	0.77	<0.56	<0.56	<0.56	1.26	0.83	<0.56
Ti	\bar{x}	118.18		625	1300	1716.7	1679.7	1790.6	2144.6	850	888.9	1625	326.3
	S	60.3		596.5	570.1	1006	1110.5	1008.5	1739.4	212.1	554.87	530.33	414.6
	S/ \bar{x}	0.51		0.95	0.44	0.59	0.66	0.56	0.81	2.5	0.62	0.33	1.27
	KK	0.02		0.12	0.24	0.32	0.32	0.34	0.4	0.15	0.14	0.25	0.06

注: \bar{x} —均值,Au的单位为 $\times 10^{-9}$,其余均为 $\times 10^{-6}$;S—均方差;S/ \bar{x} —变化系数;KK—与地壳平均含量(据黎彤,1965;其中Au取3.5)的比值。

和气泡)的多相包裹体;③流体的均一温度 $200\sim 400^{\circ}\text{C}$,爆裂温度 $322\sim 450^{\circ}\text{C}$;利用纯 CO_2 包裹体确定成矿流体压力为 $0.15\sim 0.18\text{GPa}$ 。

流体成分和热力学状态:①从I—V成矿阶段,流体的体系由 $\text{H}_2\text{O}-\text{F}^-(\text{Cl}^-)-\text{Ca}^{2+}\rightarrow \text{H}_2\text{O}-\text{Ca}^{2+}-\text{S}^{2-}(\text{SO}_4^{2-})\rightarrow \text{H}_2\text{O}-\text{Cl}^- -\text{Na}^+\rightarrow \text{H}_2-\text{SO}_4^{2-}-\text{Na}^+\rightarrow \text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{Ca}^{2+}$ 体系(表2和图3)。流体的 f_{O_2} 、 f_{CO_2} 、pH和温度,各参数随成矿演化周期性增加或降低;②从I—V阶段 $\lg f_{\text{CO}_2} \gg \lg f_{\text{O}_2}$, $\lg f_{\text{O}_2}$ 平稳变化;③ SO_4^{2-} 的摩尔数由低 \rightarrow 高 \rightarrow 低 \rightarrow 高 \rightarrow 低节律性变化,表明 f_{CO_2} 和 $f_{\text{SO}_4^{2-}}$

的摩尔数对金的迁移沉淀控制明显,而 f_{O_2} 则甚微;④ 体系的温度变化明显; pH 值变化平稳。

表 2 后石花金矿含金石英脉流体包裹体组分

Table 2 The compositions of the fluid inclusions in auriferous quartz veins in the Houshuhua gold deposit

成矿阶段	气体平衡摩尔数($\times 10^2$)					液体平衡摩尔数($\times 10^2$)						
	H ₂ O	CO ₂	H ₂	N ₂	CH ₄	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
黄铁绢英岩阶段	563.17	36.27	34.0	61.90	10.6	63.2	15.2	16.1	12.4	4.5	102.7	0.00
黄铁矿—钾长石—石英阶段	505.81	18.04	23.8	47.98	5.57	35.4	17.9	20.0	15.3	2.9	132.5	1.55
辉钼矿—石英阶段	1197.0	34.18	29.9	67.02	9.58	19.3	44.3	11.2	14.5	5.2	34.53	3.68
多金属—石英阶段	910.29	31.00	29.1	65.87	2.97	33.7	21.3	19.3	12.3	6.2	40.13	5.57
黄铁矿—石英阶段	696.35	27.67	26.3	59.49	1.17	17.6	14.4	14.6	6.09	3.2	24.25	2.08

金的溶解和迁移:24 件含金石英脉样品的测试结果表明,包裹体溶液中金的浓度随成矿阶段不同变化较明显,Ⅰ阶段为 $79.9 \times 10^{-6} \text{mol/L}$,Ⅱ阶段为 $19.9 \times 10^{-6} \sim 39.0 \times 10^{-6} \text{mol/L}$,Ⅲ阶段为 $42.0 \times 10^{-6} \sim 55.7 \times 10^{-6} \text{mol/L}$,Ⅳ阶段为 $33.5 \times 10^{-6} \sim 721 \times 10^{-6} \text{mol/L}$,Ⅴ阶段为 $20.7 \times 10^{-6} \sim 76.7 \times 10^{-6} \text{mol/L}$ 。当 H₂ 的摩尔数为 0.27~0.39 时金的溶解度最大。金的溶解度受 H₂、SO₄²⁻、Cl⁻、F⁻、Na⁺、Ca²⁺、K⁺ 的摩尔浓度控制,变化较为复杂。金迁移的络合物形式:Ⅰ—Ⅱ阶段为 Au-Cl⁻ 和 Au-CO₃²⁻ 两种形式,Ⅲ—Ⅳ阶段以 Au(S₂O₃)²⁻ 形式,Ⅴ阶段金虽有活动,但量很小。金迁移的温度:220~350℃,在 70~320℃最活跃。金迁移的 pH 值 3.0~4.0,达 4.0 时最活跃。金的沉淀:温度降低,pH 值增大,CO₂ 浓度增大,SO₄²⁻、Cl⁻、F⁻、Na⁺、K⁺ 变化显著,引起载金络合物 Au-Cl⁻、Au-CO₃²⁻、Au(S₂O₃)²⁻ 络合物分解金沉淀。

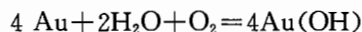
4.4 同位素地球化学及成矿

硫同位素具有深源陨硫和变质硫共同组成的特点(图 4、5、6); δD_{H_2O} (SMOW)=65‰~97‰, $\delta^{18}O$ (SMOW)=3.69‰~7.79‰,具有变质水、岩浆水混合,以岩浆水为主的特点。

5 成岩成矿作用及金矿控制

5.1 地壳构造作用及 CO₂ 流体作用

剪切带地质特征及温度、压力数据表明:剪切带深达地壳下部,具有右旋推覆斜冲性质,因而剪切带向下加宽,呈楔状体。成矿流体成分测试结果,CO₂ 的摩尔量仅次于 H₂O,氧逸度较高,说明剪切带发展早期地壳深部衍生的 CO₂ 是在相对氧化的条件下上移至楔状体顶部的脆—韧性过渡带集中的,下地壳岩石的含水矿物脱水聚集了大量的 H₂,形成 H₂-CO₂ 热水体系伴随 SiO₂ 不饱和岩浆(角闪岩、橄榄岩脉)侵入。自由 CO₂ 在强氧化条件下,即 f_{O_2} 必须在 FMQ 缓冲线上,Au 被溶解为 Au⁺:



C-O-H 流体在 700℃和 0.7GPa 条件下,缓冲线下不存在游离 CO₂,石墨相(C)稳定。当溶液溶解足够的硫化物和金后:

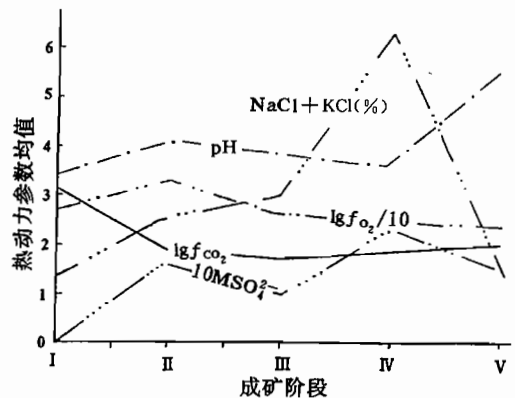
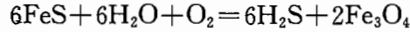


图 3 不同矿化阶段热力学参数均值变化曲线
Fig. 3 Variation of average values of thermodynamic parameters in different mineralization stage



迁移到剪切构造热液系统中,使金与来源于地壳中的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 形成络合物运移。

5.2 韧性剪切成岩过程

细粒化作用:原岩受剪切动力作用使矿物发生广泛的动态重结晶和少量研磨,形成糜棱岩和糜棱片岩。热流体作用:受流体作用而产生韧性剪切退化变质作用,使角闪岩相岩石变成绿泥片岩、绢英片岩、黄铁绢英片岩、角闪石英片岩。酸碱交代作用:在含钾钠流体作用下,形成大量黑云母、白云母(绢云母),钠长石。

5.3 韧性剪切成矿热液系统

韧性剪切带这种深层次断裂构造在形成过程中,其推覆一侧由地壳较深部位向浅部发展,导致上覆地壳出露地表剥蚀变薄。由定向应力作用和引起褶皱的作用使地壳局部加厚产生一定的构造超压作用,但主要对俯冲盘一侧产生效应。因此推覆演化总体是逐渐降压过程,降压效应和剪切带内部流体产生的膨胀渗透作用,形成了向上变窄的流体运移的渗透性楔状体,在脆-韧性过渡带形成“节流阀”,“节流阀”作用不仅使流体存在的地方形成压力梯度,而且也形成了剪切带内部的能量梯度(压力、温度、物质),导致弥漫于大面积围岩中和下地壳的液体进入了韧性剪切带中。当成矿物质聚集充分时,热液对外部围岩和下地壳开放,自身内部相对封闭,实质上处于非平衡定态体系(能量梯变),由于成矿热液上移而沉淀矿物,能量亏损得以长期存在,就从围岩和楔状体下部补充成矿物质,以达到体系相对平衡,形成了韧性剪切成矿热液系统。实质上糜棱岩化、退化变质、劈理系和蚀变矿化是韧性剪切构造造成岩成矿作用不同变形条件的产物,受控于统一

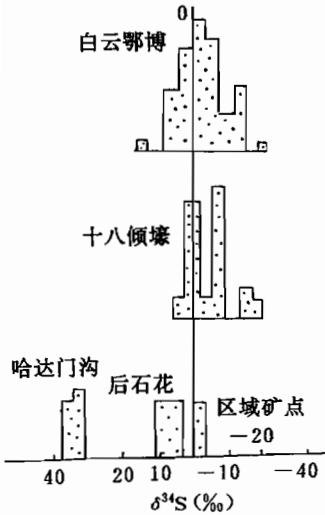


图4 内蒙古中部韧性剪切带控制的金矿床硫同位素分布图

Fig. 4 Sulphur isotopic histogram of the gold deposits controlled by ductile shear zone in middle part of Inner Mongolia

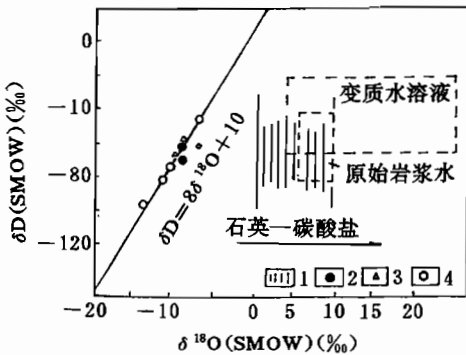


图5 十八倾壕金矿床 δD-δ¹⁸O 图

Fig. 5 δD-δ¹⁸O diagram of the Shibaqinghao gold deposits

1—十八倾壕金矿热水范围;2—晚前寒武纪和寒武纪—奥陶纪地层中地下水;3—志留纪、三叠纪和第四纪地层中地下水;4—雨水

1—Hot water of Shibaqinghao gold deposit; 2—hot water in Late Pre-Cambrian and Cambrian—Ordovician; 3—hot water in Silurian, Tertiary and Quaternary; 4—rainwater

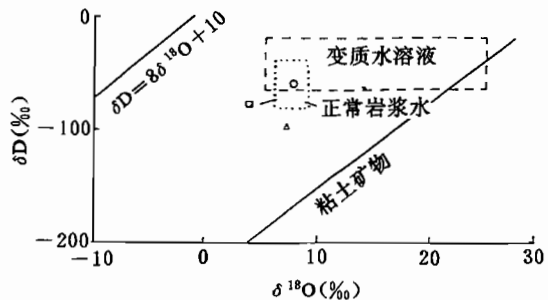


图6 后石花金矿床 δD-δ¹⁸O 图

Fig. 6 δD-δ¹⁸O diagram of the Houshihua gold deposits

○、□和△为三件样品

○, □ and △ are 3 samples

的物质场和变形场,其形成是动态过程,即成矿物质叠加积累,矿液热水起源,矿质从下地壳和围岩萃取和搬运,矿质沉淀。

5.4 金矿控制

由于韧性剪切构造岩成矿热液体系的半开放—开放性性质,体系总熵趋于零。剪切带在倾向上表现为岩石类型、变质程度、温度、压力、剪切变形性质、矿脉类型、矿脉特征、矿化潜力的带状结构(表 3),这种带状结构是体系由无序向有序演化的规律性,是有效成矿预测的依据。剪切带演化的阶段性时间上为成岩在先,成矿在后;空间上为剪切带对糜棱岩的控制;物质成分上糜棱岩化是蚀变矿化的早期物质叠加,蚀变矿化是成矿的物质积累。其核心是成岩成矿为统一的热动力系统,早期以成岩为主,中晚期以蚀变和矿化为主。

表 3 含金韧性剪切带垂向结构表

Table 3 Vertical structures of the auriferous ductile shear zones

深度 (km)	压力 (GPa)	温度 (°C)	变质程度	主要岩石类型	剪切作用性质	主要矿脉类型	矿脉特征	成矿潜力
5	1	100	热液蚀变	碎裂化岩石、断层泥	脆性变形为主	角闪岩脉,“碎矿”	角砾状构造(未变形)	可形成中等规模工业矿体
	2	200	沸石相	碎裂岩、糜棱岩化岩石				
10	3	300	葡萄石-绿纤石相		脆性—韧性过渡带	张性脉、剪切脉、鞍状脉、剪切交代脉	变形、石香肠、条带状构造	可形成工业意义较大的矿体
15	4	400	绿片岩相	糜棱岩、糜棱片岩				
20	5	500	角闪石相	糜棱片麻岩	韧性变形为主	剪切交代脉	石香肠化、透镜状条带状构造	意义较大

参 考 文 献

- 博伊尔 R W. 1984. 金的地球化学及金矿床. 马万均,王立文,罗永国,秦国兴译. 北京:地质出版社.
- 陈柏林,董法先,李中坚. 1999. 韧性剪切带型金矿成矿模式. 地质论评,45(2):186~192.
- 陈文奇,李齐,汪一鹏. 1996. 哀牢山—红河左旋走滑剪切带中新世抬升的时间序列. 地质论评,42(5):385~390.
- 杜乐天. 1988. 幔汁—H-A-C-O-N-S 流体. 大地构造与成矿,12(1):86~95.
- 韩志勇,张寿广. 1995. 陕西陶湾群北侧剪切混杂带的确定及其地质意义. 地质论评,41(3):221~228.
- 季峻峰,孙承轅,郑晴. 1994. 江西金山剪切带型金矿床中含金石英脉的成矿特征. 地质论评,40(4):361~367.
- 李树勋,刘喜山,金巍等. 1990. 含金韧性剪切带的特征——以内蒙古中部为例. 见:金矿地质论文集. 北京:地质出版社. 62~71.
- 刘继顺. 1996. 韧性剪切带中金成矿研究的若干问题. 地质论评,42(2):123~128.
- 刘淑春,章雨旭,郝梓国等. 1999. 白云鄂博赋矿白云岩成因研究历史、问题和新进展. 地质论评,45(5):477~486.
- 乔秀夫,高林志,彭阳等. 1997. 内蒙古固林忽洞群综合地层和白云鄂博矿床赋矿微晶丘. 地质学报,71(3):202~211.
- 汤家富,萧庆辉. 1987. 武功山东段韧性剪切带的变形特征和形成机制. 地质论评,33(2):129~137.
- 王楫,王保良. 1989. 华北地台北缘西段裂谷系构造特征及其成矿. 内蒙古地质,(1):67~68.
- 王玉明. 1998. 韧性剪切过程中金沉淀富集的新机制. 地质论评,44(6):643~648.
- 王志洪,卢华复. 1996. 长乐—南澳韧性剪切带走滑特征探讨. 地质论评,42(1):1~6.
- 许志琴,杨经绥,张建新等. 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. 地质学报,73(3):193~205.
- 杨开庆. 1982. 关于构造动力控岩控矿和成岩成矿问题. 地质力学论丛(第六号). 北京:科学出版社. 9~18.
- 翟淳. 1988. 桐柏北部韧性剪切带中假玄武玻璃的成因. 地质论评,34(3):203~212.
- 章雨旭,彭阳,乔秀夫等. 1998. 白云鄂博赋矿微晶丘的论证. 矿床地质,17(增刊):691~696.
- 张鹏远等. 1993. 白云鄂博地区地质构造特征. 见:中国地质科学院天津地质研究所所刊,第 28 号. 北京:地质出版社. 1~86.

- 张振法. 1988. 内蒙古地壳结构浅论. 内蒙古地质, (2):7~13.
- 张建新, 许志琴, 崔军文. 1998. 一个韧性转换挤压带的变形分解作用——以阿尔金断裂带东段为例. 地质论评, 44(4):348~356.
- 钟增球, 游振东, 索书田. 1990. 豫西秦岭造山带核部韧性剪切带岩石学研究. 地质学报, 64(2), 121~130.
- 钟增球, 索书田, 徐启东. 1996. 桐柏—大别造山带剪切带阵列的构造岩研究. 地质学报, 70(4):315~322.
- 周建波, 胡克, 洪景鹏. 1999. 稀土元素在韧性剪切带体积亏损研究中的应用——以胶南造山带构造岩为例. 地质论评, 45(3):241~246.
- Colvine A C, Fyon J A, Hcanther K B. 1986. Archean lode gold deposits in Ontario. Ontario Ministry of Natural Resources Canada. 13~30, 32~48, 79~93, 103~107, 120~125.
- Robert C. 1989. Structural geology control of gold mineralization at the Bousquet mine, Abtibi, Quebec. Can. J. Earth Sci., 26: 157~173.
- Willam P R, Nisbet B W. 1989. Shear zones, gold mineralization and structural history in the leonora district, Eastern Goldfields Province, Western Australia. Australian Journal of Earth science, 36: 383~403.

Diagenetic Mineralization in Control of Gold Deposits in the Ductile Shear Zones

—A Case History of the Houshuhua Gold Deposit in Wuchuan County, Inner Mongolia

Jia Guozhi Liang Haijun

The First Bureau of Geological Exploration of Gold Headquarters, Harbin, 150086

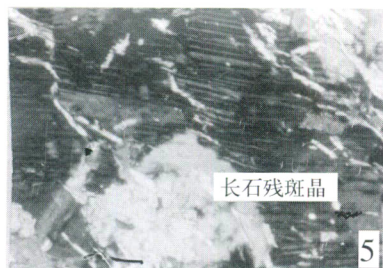
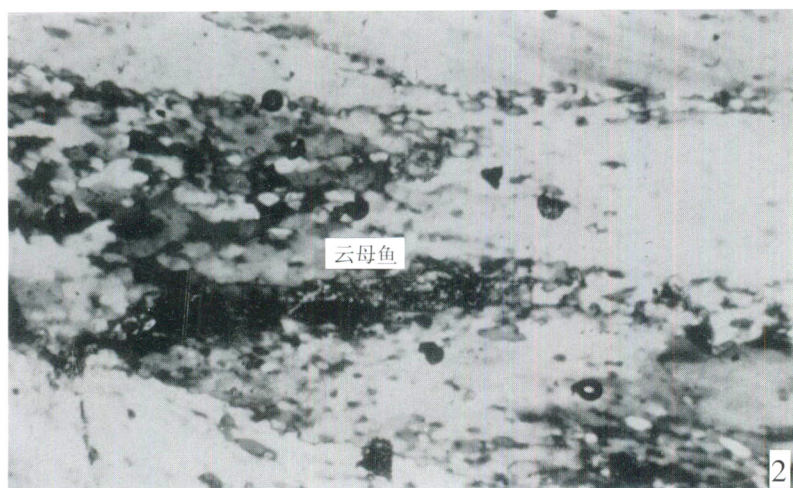
Abstract

Exemplified by a case history, the Houshuhua gold deposit in the central—west Inner Mongolia Autonomous Region, the present paper briefly describes the characteristics of the ductile zones, and advances the new viewpoint of a "diagenetic and ore-forming hydrothermal system of the ductile shear zones". The studies show that diagenetic processes of ductile shearing consist of the fine granulation process, thermal fluid process, and acidic and alkali metasomatism. In the process of forming such intensive fractures as the ductile shear zones, the side of the thrusting wall was developed in the direction from the relatively deeper part to the crust to the shallower one. The pressure—dropping effect and the dilatational permeation action within the ductile zones themselves contributed to the accumulation of energy gradients (including pressure, temperature and substance) inside the shear zones. As a result, the fluid extensively diffusing in the wall rocks and the lower crust entered into the ductile shear zones. The effect of the "throttle valves" resulted in a metallogenetic hydrothermal fluid system of ductile shearing. The kernel of ore control by the structure of ductile shearing is that the diagenetic mineralization proves to be a unified thermodynamic system, with diagenesis predominant in the early stage and alteration and mineralization predominant in the middle and late stages.

Key words: Ductile shear zone; tectonopetrogenesis and tectonometallogenesis; gold deposit; central—west Inner Mongolia

作者简介

贾国志,男,1958年生。1982年毕业于河北地质学院,1991年在中国地质大学(北京)找矿勘探专业获硕士学位。现在武警黄金第一总队从事金矿床找矿勘探和技术管理工作。通讯地址:150086,哈尔滨市南岗区,武警黄金第一总队;电话:0451—6672568,6663946—2028。



1. 鞘褶皱形态。
2. 产于变形石英颗粒和亚颗粒构成的核幔结构中的云母鱼， $\times 20$ ，正交偏光。
3. 发育于糜棱岩中的石英细脉不对称小褶皱。
4. 压溶作用形成的石榴子石压力影结构。
5. 长石残斑晶， $\times 10$ ，正交偏光。
6. 由石英亚颗粒（变形纹）形成的核幔结构， $\times 5$ ，正交偏光。