

黔东南锦屏 - 天柱地区构造控岩控金特征 模拟实验及其力学分析

吴学益¹, 卢焕章^{1,2}, 吕古贤³, 王中刚¹, 胡瑞忠¹, 陈文一⁴, 朱笑青¹

(1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 魁北克大学地质系, G7H 2B1, 加拿大; 3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 4. 贵州省地矿局地质科学研究所, 贵州 贵阳 550004)

摘要:在前人工作基础上,侧重研究石英脉型金矿床成矿的地质背景,建立了该类型金矿的成矿模式。进而开展三轴温压条件下的成岩成矿实验,构造形变特征及其与成矿物质活化、迁移、富集之间的相互关系的模拟实验。实验结果表明:(1)该区岩石、矿石在高温高压条件下,产生塑性变形(褶皱)和脆性变形(破裂);(2)在变形过程中使成矿物质活化、迁移和富集,形成顺层及穿层的含金石英脉,并在多期多次变形过程中使成矿物质叠加富集;(3)在褶皱(背斜)轴部形成富矿体。模拟实验结果与所建立的该类型金矿构造控矿和成矿模式非常相似。实验资料的力学分析表明,由轴压所产生的构造附加压力大大地提高了实际围压,从而促进了岩石流变、变形和物质的迁移,由此促进含矿流体向构造附加压力小的部位定向迁移、充填和成矿。构造附加压力是促进该区金成矿的重要动力条件。

关键词:金矿;构造控金;模拟实验;锦屏 - 天柱地区;贵州**中图分类号:**P554 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1552(2006)03-0355-14

1 黔东南锦屏 - 天柱地区金矿成矿的地质背景

该区处于华南加里东褶皱带与扬子地台的接合部位(贵州省地质矿产局,1987)。区内出露地层有前震旦系下江群、震旦系、石炭系、二叠系、侏罗系、白垩系及零星分布的第四系。根据地层的接触关系,我们可将其划分为前震旦系雪峰期构造层,泥盆系前的加里东期构造层,三叠系前的海西 - 印支期构造层以及侏罗系地层沉积之后的燕山 - 喜马拉雅期构造层(卢焕章等,2005)。黔东南锦屏 - 天柱地区石英脉型金矿主要分布在晚元古界下江群浅变质岩系 - 浊积岩地层中。岩性为一套浅变质杂砂岩、

岩屑砂岩、凝灰质砂岩夹火山熔岩、集块岩、火山角砾岩以及泥砂混积的浊积岩等。其中所夹的火山物质为该区成矿提供了丰富的物质基础。

该区经历多期多次的构造活动,为金的活化、迁移提供热动力条件,特别是构造活动所形成的褶皱、断裂为金矿成矿提供有利的空间条件和物理化学环境,使含金石英脉在有利的构造部位形成有工业价值的石英脉型金矿床。

2 研究区构造特征

根据遥感和区测资料以及近年来的实际材料,我们编制了黔东南锦屏 - 天柱地区构造地质与金矿分布图(图1)。该区构造具以下特征:

收稿日期:2005-10-19; **改回日期:**2006-01-10**基金项目:**本文为中国科学院杰出基金及贵州省政府科技基金资助研究的部分成果。**作者简介:**吴学益(1934-),男,研究员,长期从事矿田、矿床构造和构造地球化学(构造与成矿)及其模拟实验研究。

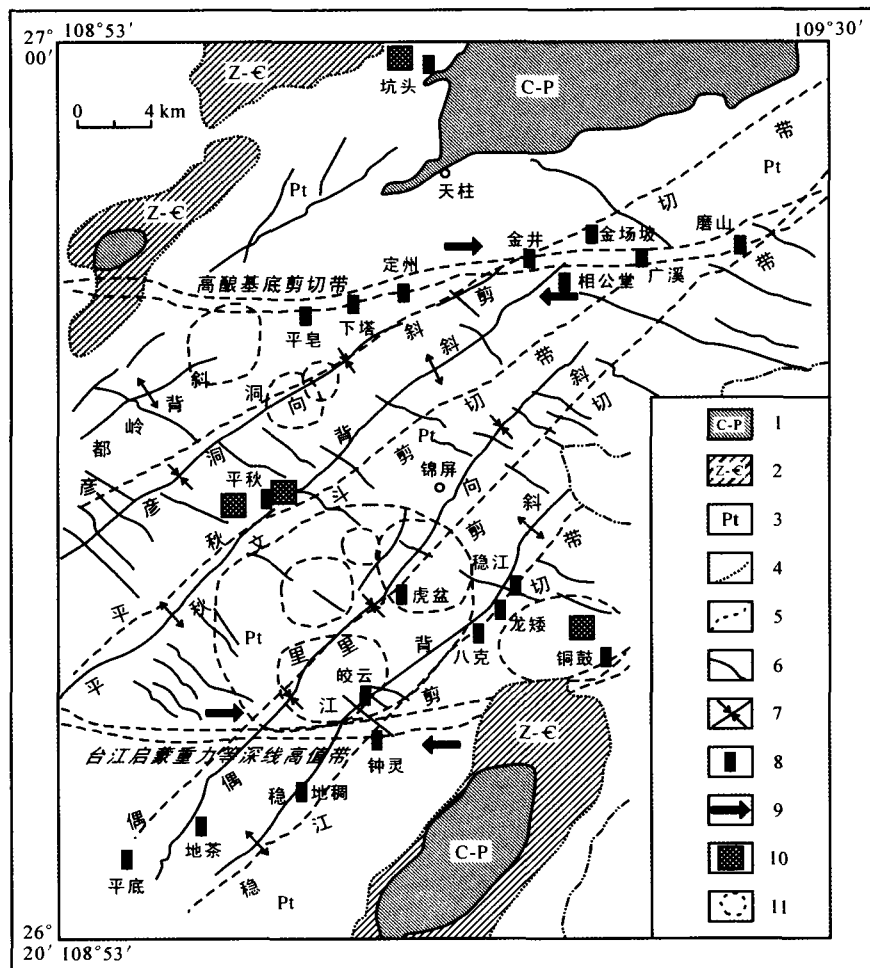


图 1 黔东南锦屏 - 天柱及邻区构造地质图 (据卢焕章等, 2005, 略改)

- 1 - 海西 - 印支期构造层; 2 - 加里东期构造层; 3 - 雪峰期构造层; 4 - 角度不整合界线;
- 5 - 剪切断裂带; 6 - 断层; 7 - 背斜和向斜轴; 8 - 金矿点; 9 - 剪切力方向; 10 - 年龄样品点;
- 11 - 遥感环形构造

Fig. 1 Sketch map showing geological structures of Jingping - Tianzhu and its adjacent regions in SE Guizhou

(1) 东西向基底断裂构造 区内发育两条东西向基底断裂构造: 其一是北部的凯寨 - 高酿基底断裂, 其二是南部凯里 - 台江 - 剑河 - 启蒙基底断裂带, 即台江启蒙重力等深线高值带, 是一条地球物理重力等深线的高速带, 也是一条基底剪切带。加里东运动使这两条基底断裂带发生右行剪切作用, 在两者之间形成了一系列大致平行的北东向褶皱和断裂, 构成该区主要构造格局。

(2) 北东向褶皱构造 该区的褶皱构造由背斜和向斜组成。有些背斜上还发育次级背斜构造而构成复式背斜。褶皱构造大体可分基底褶皱和盖层褶皱。基底褶皱主要是加里东运动形成的, 呈北东向展布; 盖层褶皱主要是燕山运动形成的, 它除继承和

叠加在加里东期北东向褶皱外, 尚有部分呈北北东向的褶皱。

(3) 断裂带 该区断裂带主要为北东向的剪切带。

这些剪切带都与北东向褶皱相伴出现, 是在褶皱形成过程中平行褶皱轴向断裂的基础上进一步发展所形成的。

(4) 裂隙构造 是褶皱变形过程中在平面上、剖面上产生的共轭 X 剪切裂隙, 层间滑动时形成的顺层裂隙和穿层裂隙, 以及剪切带和断裂带活动过程中的不规则裂隙, 所有这些裂隙与金矿的形成和分布关系密切。

3 研究区构造控金特征

黔东南锦屏 - 天柱地区构造对石英脉型金矿的控制作用非常明显, 该区构造控金具有以下特征:

(1) 东西向断裂构造控制金矿床、矿点呈东西向带状分布。如近东西向的凯寨 - 高酿基底断裂控制下达 - 金井 - 广溪 - 磨山 - 新寨等金矿呈东西带状分布 (图 1)。

(2) 北东向褶皱、断裂控制石英脉型金矿床。如坑头背斜、断裂控制坑头金矿床; 平秋背斜和平秋 - 文斗剪切带控制平秋金矿床; 稳江背斜如稳江剪切带控制八克金矿床; 同古雷打坡背斜 (又称山洞背斜) 和断层控制同古金矿床 (图 2、3) (吴攀, 1999)。

(3) 北东向褶皱的层间虚脱部位或层间破碎带和穿层破碎带或裂隙带控制石英脉金矿体。如同古雷打坡 (又名山洞) 背斜的轴部虚脱部位控制多层顺层充填的层状、似层状、透镜状石英脉金矿体 (M₁ 矿体) 以及穿层的断裂破碎带、裂隙带控制的穿层石英脉矿体 (M₂ 矿体) (图 3)。

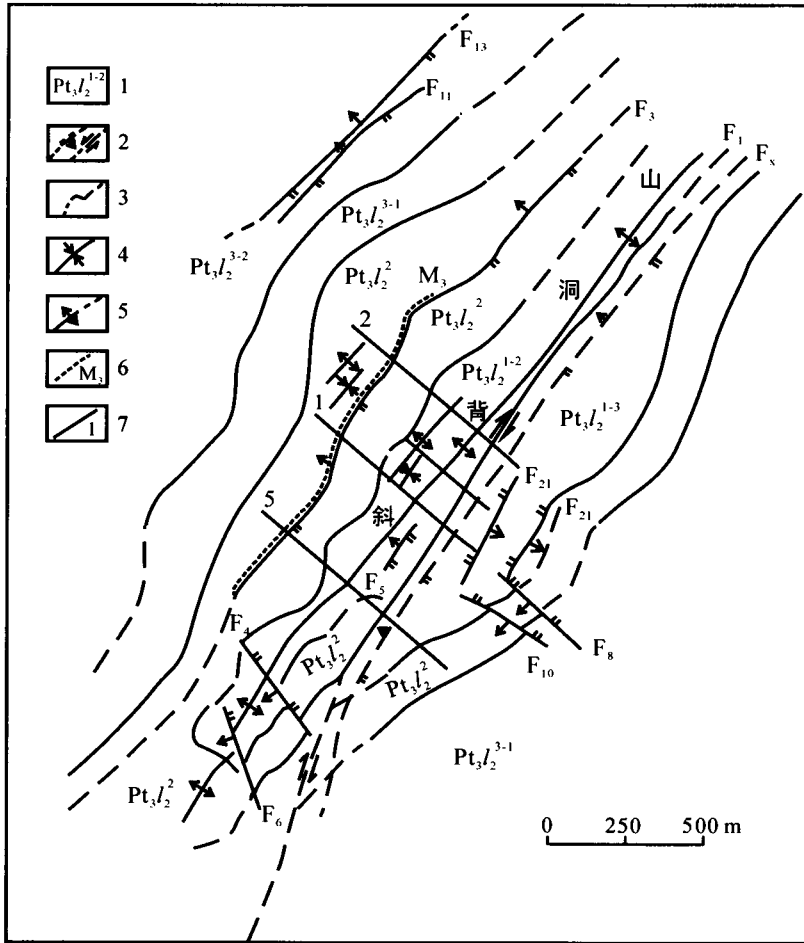


图 2 黔东南同古金矿地质简图(据吴攀,1999)

1 - 地层代号; 2 - 逆断层、平移断层及推测; 3 - 地层界线及推测; 4 - 向斜; 5 - 背斜及推测; 6 - 含金石英脉及编号; 7 - 勘探线及编号

Fig. 2 Geological sketch map of Tonggu gold deposit in East Guizhou

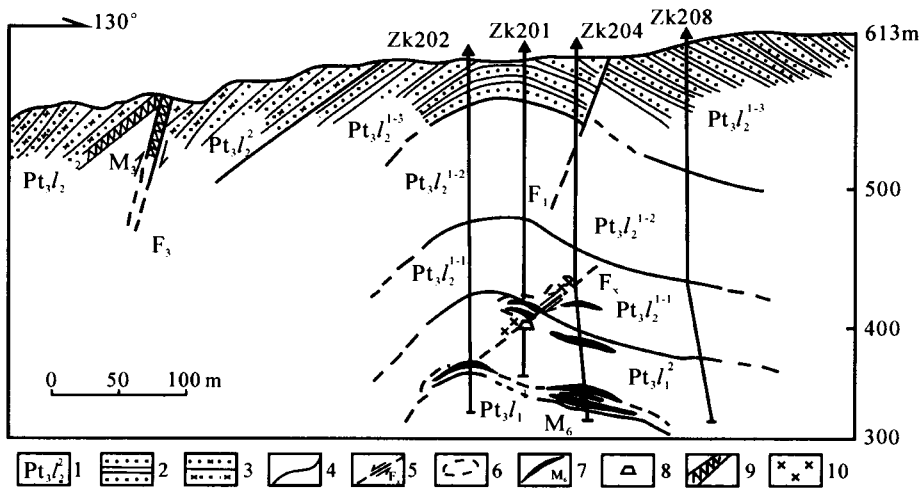


图 3 同古金矿地质剖面图(据吴攀,1999)

1 - 地层代号; 2 - 砂质板岩; 3 - 变余砂岩; 4 - 地层界线; 5 - 断层及推测; 6 - 蚀变带; 7 - 含金石英脉; 8 - 平洞; 9 - 沿 F₃ 断裂分布的含金石英脉; 10 - 含金网脉型矿体

Fig. 3 Geological section showing a quartz vein in Tonggu gold deposit

4 研究区金矿成矿模式

如前所述,锦屏-天柱地区发育两条东西向基底深大断裂,南部的凯里-台江-剑河-启蒙基底断裂;北部的凯寨-高酿基底断裂,在它们相对剪切作用下,两断裂之间形成了一系列北东向的褶皱和断裂,构成了该区的基本构造格局(如图1)。

根据对同古金矿区地层含金性研究(吴攀,1999),地层岩石中含金高于地壳平均值(如表1)。我们对锦屏县城至平秋镇公路剖面地层岩石含金性研究,也就得类似结果(如表2)。其中夹有火山物质的砂岩、板岩含金较高,及处于褶皱轴部的岩石,其含金量也明显增高。

表 1 锦屏县同古金矿地层含金性分析结果

Table 1 Analytical results of aurum contents in samples from the Tonggu gold deposit in Jinping, Guizhou

序号	样号	岩性及产状	含金($\times 10^{-9}$)	序号	样号	岩性及产状	含金($\times 10^{-9}$)
1	TGP01	灰白色半风化条纹状板岩	3.30	15	TGP15	灰色块状板岩	1.70
2	TGP02	灰色条纹状板岩	7.40	16	TGP16	灰色条纹状板岩	3.30
3	TGP03	灰绿色密集条纹状板岩	14.00	17	TGP17	灰绿色块状板岩	3.30
4	TGP04	灰色条纹状板岩	11.00	18	TGP18	灰色块状板岩	3.00
5	TGP05	灰色条纹状板岩	5.10	19	TGP19	灰色条纹状板岩	3.30
6	TGP06	灰色密集条纹状板岩	3.80	20	TGP20	灰色条纹状板岩	3.20
7	TGP07	浅灰色变余砂岩	5.40	21	TGP21	灰色密集条纹状板岩	4.20
8	TGP08	灰色条纹状板岩	4.80	22	TGP22	灰色密集条纹状板岩	3.00
9	TGP09	灰色块状板岩	7.40	23	TGP23	灰色条纹条带状板岩	3.00
10	TGP10	灰色密集条纹状板岩	2.40	24	TGP24	深灰色条纹状碳质板岩	3.00
11	TGP11	灰色条纹状粉砂质板岩	7.20	25	TGP25	浅灰色变余砂岩	5.40
12	TGP12	灰绿色块状板岩	6.60	26	TGP26	灰色带状粉砂质板岩	14.00
13	TGP13	灰绿色条纹状板岩	4.80	27	TGP27	灰绿色块状变余细砂岩	6.20
14	TGP14	灰绿色板岩	5.00			金的地壳丰度为 4×10^{-9}	平均 5.36

测试单位:贵州省地矿局 117 地质队(据吴攀,1999)

表 2 锦屏县城-平秋镇沿公路剖面岩石含金性分析

Table 2 Analytical results of aurum contents in samples from Pingqiu Town section in Jinping, Guizhou

序号	样号	岩性及产状	含金($\times 10^{-9}$)	序号	样号	岩性及产状	含金($\times 10^{-9}$)
1	J4	浅灰黄色浊积岩	1.05	17	P24	浅黄色变余砂岩	2.40
2	J5	灰色浊积岩	2.60	18	P22	浅灰色凝灰质板岩	1.60
3	J7	浅灰色浊积岩	0.75	19	P21	浅黄褐色变余砂岩	1.25
4	J8	浅黄色浊积岩	0.55	20	P19	灰黄色变余砂岩	0.30
5	J10	灰色浊积岩	0.85	21	P17	灰黄色变余砂岩	0.50
6	J11	浅黄色浊积岩	0.96	22	P16	浅灰色凝灰质板岩	0.60
7	J12	浅黄色浊积岩	1.40	23	P13	浅灰色凝灰质板岩	0.68
8	J13	浅灰色凝灰质板岩	2.25	24	P11	浅灰色凝灰质板岩	3.05
9	J14	浅灰色浊积岩	1.95	25	P9	浅灰色凝灰质板岩	6.15
10	P32	浅灰色变余砂岩	2.65	26	P7	紫红色凝灰质板岩	3.20
11	P31	浅黄色变余砂岩	37.60	27	P6	浅灰色凝灰质板岩	27.90
12	P29	浅黄色变余砂岩	0.50	28	P4	浅灰色凝灰质板岩	103.0
13	P28	浅黄色变余砂岩	1.15	29	P3	褐色变余砂岩	5.30
14	P27	浅灰色凝灰质板岩	1.50	30	P1-1	浅灰色变余砂岩	1.80
15	P26	浅黄色变余砂岩	1.50			平均含金	7.13
16	P25	浅黄色变余砂岩	0.15			金的地壳丰度	4.00

测试单位:中国科学院地球化学研究所

以上实际材料说明,该区有丰富的成矿物质,而且在构造热动力作用下,金及其它成矿物质产生活化、迁移和聚集。

该区深断裂活动,一方面为金成矿带来部分成矿物质;另一方面使矿源层(岩)中的金活化、迁移到褶皱构造的虚脱部位形成一种整合层间脉矿体,常沿背斜轴部分布,顺层产出,呈层状、似层状、扁豆状、透镜状;另一种是不整合的矿体,产状较陡,常穿层产出,多沿断裂破碎带、剪切带或裂隙充填呈陡脉状产出(如图3)。这种由深大断裂剪切活动产生褶皱、断裂以及顺层和穿层的金矿体就是该区石英脉型金矿的成矿模式。在锦屏县城南三江路红星桥头公路边岩壁上出现的剪切带-背斜-石英脉三者在剖面上所反映出的相互关系(如照片15成矿模式的野外照片),就是黔东南锦屏-天柱地区石英脉型金矿成矿模式的具体表现。

该区的石英脉型金矿床表现出典型的构造控岩控矿特征,作者进一步探讨该类型矿床的构造动力成岩成矿过程。本文的实验就是反演展示构造控岩控矿和动力成岩成矿的过程,为探讨成矿规律推动地质找矿工作服务。

5 构造控金模拟实验

5.1 构造控金模拟实验条件和方法

构造控金模拟实验,是运用中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室中构造地球化学实验室的实验条件进行的(吴学益等,1984,1986a)。方法是:将野外采集的岩石、矿石切制成 $\phi(17 \times 40)$ mm 或 $(17 \times 17 \times 60 \sim 100)$ mm 规格的天然干样,或用清水、NaCl 溶液浸泡过的样品装入高压容器或模具中,有时在实验前将不同浓度和不同重量的 NaCl 溶液加到模具中样品的底部,使溶液在实验中参与反应以促进岩石、矿石样品的变形及成矿物质活化、迁移等方面的变化。有时将所采集的岩石、矿石碾成粉末,然后用清水或 NaCl 溶液与粉末样拌匀,冷压成型后再装进高压容器或模具中进行高温高压实验。

作为构造地球化学实验装置特点之一是在加温加压时,主要采用应力方式,而且施加的轴压与围压同时进行,轴压与围压之间存在差异应力,致使样品容易产生变形、破裂乃至成矿物质产生活化、迁移与聚集。

实验样品是采用天然岩石或矿石,按照实际情

况设计实验方案,当温度、压力达到预期目的后,终止实验,并使之自然冷却,当冷却到室温状态时,将试样取出切制光薄片,并与实验前光薄片进行显微镜下对比观察或其它测试分析,研究其结构、构造及成分特征,构造地球化学(构造与成矿)高温高压实验结果所获得的形变与成分变化特征及其变化规律,基本能够反映野外自然状态下构造控岩控矿和构造动力成岩成矿的结果。

5.2 岩石构造变形实验

用黔东南不同岩石、矿石进行构造变形实验,实验结果如表3。

从实验结果可以看出:(1)实验前样品变形均不明显如照片1、照片3、照片5(照片均编排在英文摘要之后——编者注);(2)实验后样品普遍产生变形、破裂,如照片2实验后产生弱塑性变形,发育不太明显的裂隙;(3)当温度、压力较低,时间较短时,其所产生的变形、破裂不太明显,如照片2,这时产生的破裂也不规则,如照片6;(4)当温度、压力较高,时间较长时多发育明显的共轭X交叉裂隙,沿裂隙有剪切错移和塑性变形特征,如照片4;(5)实验条件相近,而岩性不同时所产生的变形、破裂为成矿物质的活化、迁移、聚集、沉淀,提供了有利的空间条件。

5.3 构造条件下物质活化、迁移成矿实验

为了模拟构造与成矿物质活化、迁移与富集的模拟实验,我们在切制好的样品下部放置冷压成型的含硫化物的金精矿样品(含金品位59.77g/t),表示下部含金矿源层,一起进行高温高压模拟实验。实验前还加入不同浓度和不同重量的 NaCl 溶液至样品的底部,使其在实验过程中参与实验,实验结果如表4。

实验结果表明:实验前样品变形都不明显。如照片7、9、11。而实验后相对应的同一样品不仅变形破裂明显,样品中的成矿物质——金硫化物也产生活化、迁移和聚集。如照片8、10、12。随着实验温度压力的增高,实验时间的延长,试样的变形破裂更发育,成矿物质活化、迁移和聚集现象越来越明显。如照片8中金硫化物沿变余砂岩中新产生的裂隙充填。特别是实验前先注入5%至20%浓度的 NaCl 溶液到样品的底部,在实验过程中与样品作用,致使试样的变形破裂及成矿物质活化、迁移和聚集的现象更加明显。如照片10中粉砂质板岩,实验后发育顺层与穿层裂隙,金硫化物沿裂隙充填。又如照片12中铁白云石化板岩,实验后裂隙非常发育,金硫化物活化、迁移、聚集现象更加明显,并充填在裂隙中。

表 3 构造与岩石、矿石变形、破裂模拟实验结果

Table 3 Results of simulation experiments for structures, deformation and fracturing of rocks and ores

矿区	样品号	样品名称	样品状态	实验条件							实验前后样品主要特征	
				温度 (°C)	轴压 (MPa)	围压 (MPa)	时间 (h)	差应力 (MPa)	平均应力 (MPa)	构造附加 压力(MPa)		
平 秋 金 矿	GZ ₀₄ -21		实验前									矿物颗粒小,条带明显,但无明显变形
	GZ ₀₄ -21-1	粉砂质	实验加入 10% 浓度 NaCl 液 80g	400	1500	375	64	1125	750	375		实验后弱塑性变形,条带微弯曲,发育不明显顺层和穿层微裂隙
	GZ ₀₄ -21-7	板岩	加 10% NaCl 液 90g	400	1750	437	267	1313	874.7	437.7		实验后上端呈弧形下弯,中下部发育顺层与穿层裂隙及交叉裂隙
	GZ ₀₄ -21-8	岩	加 15% NaCl 液 80g	400	1100	275	74	825	550	275		实验后发育一组顺层,一组穿层的交叉裂隙
	GZ ₀₄ -3-1		加 5% NaCl 液 80g	480	1450	362	51	1088	724.7	362.7		实验后发育不太明显的交叉裂隙
	GZ ₀₄ -3-2		加 5% NaCl 液 35g	320	1750	437	27	1313	874.7	437.7		
	GZ ₀₄ -3-6	砂质	加 5% NaCl 液 50g	560	1650	412	50	1238	824.7	412.7		实验后呈波状弯曲,发育顺层与穿层裂隙
	GZ ₀₃ -15-1	板岩	加 5% NaCl 液 80g	560	1650	412	24	1238	824.7	112.7		实验后发育交叉裂隙,其中一组旁侧发育小型牵引褶曲
	GZ ₀₃ -15-2		加 5% NaCl 液 85g	560	1600	400	98	1200	800	400		实验后发育交叉裂隙,并分割试样
	GZ ₀₃ -15-3		加 10% NaCl 液 20g	560	1750	435	50	1315	873.3	438.3		实验后发育不规则裂隙
同 古 金 矿	GZ ₀₃ -25		实验前									矿物颗粒均匀,无明显变形
	GZ ₀₃ -25-5	变余	加 20% NaCl 液 90g	560	2200	550	120	1650	1100	550		实验后发育两组交叉裂隙
	GZ ₀₃ -25-2	砂岩	加 5% NaCl 液 85g	560	1750	437	98	1313	874.7	437.7		实验后发育两组交叉裂隙并分割试样呈似角砾状
	GZ ₀₃ -25-1		加 5% NaCl 液 65g	560	1720	430	24	1290	860	430		实验后发育不太明显的共轭 X 交叉裂隙并分割试样
	GZ ₀₂ -12-1	砂质	加 5% NaCl 液 40g	480	1400	350	23	1050	700	350		实验后产生平行压应力的张裂及斜向剪裂隙
	GZ ₀₂ -12-9	板岩	加 20% NaCl 液 50g	480	1600	400	30	1200	800	400		实验后产生顺序层及穿层交叉裂隙
GZ ₀₂ -12-10	岩	加 20% NaCl 液 150g	480	1450	360	32	1090	723.3	360			
八 克 金 矿	BK5 ₍₁₎	铁白云石板岩	实验前									矿物颗粒较均匀无明显变形
	BK5-2		加 10% NaCl 液 100g	560	1550	387	30	1163	774.7	387.7		实验后发育不规则交叉裂隙
	GZ ₀₃ -28-1	砂质	加 5% NaCl 液 50g	560	1450	362	50	1088	724.7	362.7		实验后发育共轭 X 裂隙,中心部位密集
	GZ ₀₃ -28-2	板岩	加 10% NaCl 液 110g	560	1950	485	120	1465	973.7	488.3		实验后产生不规则交叉裂隙,并分割试样
	GZ ₀₃ -28-3	岩	加 10% NaCl 液 80g	560	2050	510	170	1540	1023.3	513.3		实验后发育共轭 X 交叉裂隙

注:差应力即轴-围压所得值;平均应力 = $(b_1 + b_2 + b_3)/3$, 其中 $b_2 = b_3$; 构造附加压力 = 平均压力 - 围压

表 4 构造控制成矿过程模拟实验结果
Table 4 Results of simulation experiment for tectono-controlling metallogenesis

矿区	样品号	样品名称	样品状态	实验条件						实验前后样品主要特征	
				温度 (°C)	轴压 (MPa)	围压 (MPa)	时间 (h)	差应力 (MPa)	平均应力 (MPa)		构造附加压力 (MPa)
	GZ ₀₃ -15		实验前								矿物颗粒大小均匀无明显变形
	GZ ₀₃ -15-6	变金	加 10% NaCl 液 35g	560	2000	500	73	1500	1000	500	实验后不规则裂隙发育, 金硫化物沿顺层裂隙充填
	GZ ₀₃ -15-7	砂岩	加 20% NaCl 液 110g	560	2100	525	246	1575	1050	525	实验后发育顺层与穿层裂隙金硫化物沿顺层裂隙充填
	GZ ₀₃ -15-8		加 20% NaCl 液 110g	560	2100	525	361	1575	1050	525	实验后顺层滑动呈波状发育, 层间与穿层裂隙有金硫化物充填
平秋金矿	GZ ₀₄ -21-5		加 10% NaCl 液 100g	400	1600	400	400	1200	800	400	实验后层理微弯曲顺层与穿层裂隙成 X 裂隙, 金硫化物充填其中
	GZ ₀₄ -21-6	变余砂	加 10% NaCl 液 80g	400	1800	450	506	1350	900	450	实验后上端向下弯, 发育顺层与穿层成 X 裂隙, 金硫化物充填其中
	GZ ₀₄ -21-9	质板岩	加 15% NaCl 液 90g	400	1600	400	146	1200	800	400	实验后上端向下弯, 硫化物也弯曲, 层间滑动呈波状局部见金硫化物
	GZ ₀₃ -21-10		加 15% NaCl 液 140g	560	2000	500	120	1500	1000	500	实验后上端向下弯呈弧形, 并顺层滑动成褶曲及层间裂隙, 偶见硫化物
	GZ ₀₃ -21-11		加 15% NaCl 液 95g	560	1500	375	72	1125	1083	708	实验后上端向下弯, 中部顺层成波状, 有层间裂隙并充填金硫化物
	GZ ₀₃ -21-12		加 15% NaCl 液 110g	560	1724	430	362	1297	1195	765	实验后塑性变形明显, 顺层波状弯曲, 金硫化物明显活化, 迁移与聚集充填
	GZ ₀₂ -12		实验前								矿物颗粒细小均匀无明显变形
同古金矿	GZ ₀₂ -12-2	粉砂	加 20% NaCl 液 80g	480	1650	410	32	1240	823.3	413.3	实验后产生顺层与穿层裂隙, 金硫化物沿裂隙充填
	GZ ₀₂ -25-3	质板岩	加 10% NaCl 液 40g	560	2150	537	362	1613	1074.7	537.7	实验后产生顺层与穿层裂隙, 金硫化物沿顺层裂隙充填
	GZ ₀₂ -25-8		加 10% NaCl 液 50g	560	1600	400	170	1200	800	400	实验后发育共轭 X 交叉裂隙, 金硫化物沿裂隙充填
	BK5 ₍₂₎		实验前								矿物均匀, 铁白云石另星分布
八克金矿	BK5-3	铁白云石化板岩	加 10% NaCl 液 100g	560	1500	387	67	1125	750	375	实验后裂隙发育, 金硫化物沿张裂隙聚集充填
	BK5-4		加 10% NaCl 液 110g	560	1248	312	74	936	624	312	实验后发育不规则的裂隙, 金硫化物沿裂隙聚集充填
	BK5-5		加 10% NaCl 液 95g	560	1440	360	74	1080	720	360	实验后发育不很明显 X 的裂隙, 金硫化物沿裂隙充填

注: 差应力即轴 - 围压所得值; 平均应力 = $(b_1 + b_2 + b_3) / 3$, 其中 $b_2 = b_3$; 构造附加压力 = 平均压力 - 围压

5.4 黄铁矿实验前后成分的分析对比

我们选择与黔东南石英脉型金矿成矿关系密切的黄铁矿进行成分变化模拟实验, 并与实验前黄铁

矿的成分进行对比(表 5)。

实验分析结果表明: 实验后黄铁矿中的成矿元素比实验前黄铁矿中的成矿元素有增高的趋势, 这

表 5 实验前后黄铁矿的探针分析结果

Table 5 Results of electron probe analyses of pyrite before and after experiment

成 分	Fe	S	As	Au	Cu	Ag	Zn	总量
实验前黄铁矿	46.060	54.160	0.136	0.011			0.006	100.373
	45.408	51.304	2.654		0.007			99.373
	45.675	52.648	1.753	0.022				100.098
	45.274	53.111	1.335					99.720
实验后黄铁矿	46.266	52.260	2.195	0.011	0.032	0.153		100.917
	45.847	51.540	2.567	0.044			0.030	100.028
	45.648	52.469	1.343	0.011	0.106	0.140	0.079	99.796
	46.613	52.933	0.320	0.172	0.034	0.070		100.141

分析单位:中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室

和前面岩石变形、矿脉形成成矿物质活化、迁移模拟实验结果一致。

6 实验结果及成岩成矿构造附加压力分析

构造与成岩、成矿有关的地质现象已为广泛认可(哈克,1932;叶利谢夫,1963;王嘉阴,1978;陈国达,1960,1978,1982;杨开庆,1982,1986;吴学益等,1986b),然而其动力学机制经过一个多世纪的研究,实验和争论,目前仍没有解决有关的基本理论问题,核心的问题在于,构造形迹主要是差应力的产物,而差切力或剪应力不是独立变量,它不能影响流体的运移和其中的化学过程。因此英国地质学会构造组在“构造变形与变质的关系讨论会”的总结中仍指出:理论和实验尚不能提出差应力影响化学平衡 $P-T$ 数据的成果。因此,是否回到哈克“应力矿物”的问题仍没有解决。

吕古贤等(1982,1993)提出构造附加静压力的研究,指出构造偏应力场中的平均应力部分与压力,属同一量纲的各向等压(张)力参量,与围压同样影响化学过程,对于本实验过程用构造附加压力观点给以动力机制探讨(马瑞等,2004)。

(1) 温度 $400 \sim 560^\circ\text{C}$ 范围内,施加轴压在 $1450 \sim 2200\text{MPa}$ 的情况下,其平均应力大于所给定的围压压力,其超出围压的部分即构造附加压力。构造附加压力的大体超过原围压压力值的 1 倍。

(2) 施加轴压的构造温压实验结果表明,岩石的变形性质,共轭裂隙发育程度与最大主压构造应力方面有密切关系;流变及次生变质的程度增强,证实其不仅与静岩压即围压与温度有关,还与构造附加压力作用而提高的总压力即实验中的平均压力有关。

(3) 构造作用下成矿地球化学实验有效地证实了区内石英脉金矿床的构造控矿与构造成矿的主要特点。主要模拟实验结果如下:

a. 构造作用下岩石变形而形成顺层和穿层裂隙,为该区形成顺层和穿层的石英脉型金矿提供成矿空间条件。该模拟实验结果证实了顺层和穿层的石英脉型金矿成因。如照片 10,粉砂质板岩实验后形成顺层和穿层裂隙,金硫化物沿裂隙充填;

b. 构造变形过程中,石英脉以塑性流动形式充填而形成石英脉金矿(如照片 13)。模拟实验证实定向构造力增加了岩石的流变强度促进了矿质聚集。照片 14 为粉砂质板岩,在高温高压作用下,岩石变形过程中,金硫化物(黑色)以塑性流动状态顺层充填,类似形成顺层的石英脉金矿体;

c. 构造热动力作用岩石褶皱,并使成矿物质在褶皱核部充填虚脱空间形成金矿体。模拟了构造产生褶皱虚脱及矿脉充填的全过程,如照片 16,变余砂岩实验形成褶皱,含金硫化物(黑色)与石英(白色)沿褶皱核部的虚脱部位充填。

(4) 由于受力样品内部发生明显的变形和物质迁移,其内部的力学边界条件已经发生变化。然而今后的实验配以更详细的力学分析,可以进一步证实各部位的构造变形与应力的分布不均一,其构造附加压力直接影响着该点局部的总压力,进一步能够控制成岩成矿地球化学平衡的迁移和变化。

构造地球化学实验初步证实了锦屏-天柱地区石英脉型金矿的成矿模式,为该区构造控矿提供了重要的科学实验资料和依据,也为研究该区金矿成矿规律及进一步找矿提供了有益信息。

参考文献:

- 陈国达. 1960. 地台活化说及其找矿意义. 北京:地质出版社.
- 陈国达. 1978. 成矿构造研究法. 北京:地质出版社.
- 陈国达. 1982. 多因复成矿床并从地壳演化规律看其形成机理. 大地构造与成矿学, 6(1): 33-55.
- 贵州省地质矿产局. 1987. 贵州省区域地质志. 北京:地质出版社.
- 哈克 A. 1932. 变质作用-岩石转变的研究. 北京:地质出版社, 1981 年中译本:372.
- 吕古贤. 1982. 北京延庆石槽铜矿矿田构造研究. 见:中国地质科学院年报. 北京:地质出版社, 192-194, 971-973.
- 吕古贤, 孔庆存. 1993. 胶东玲珑-焦家式金矿地质. 北京:科学出版社, 1-253.
- 卢焕章, 王中刚, 吴学益, 陈文益, 朱笑青, 郭迪江, 胡瑞忠, Moussa Keita. 2005. 贵州东南部的地质构造与金矿床的关系. 地质学报, 79(1): 98-105.
- 马瑞, 刘正宏, 吕古贤, 张刚. 2005. 差应力状态对岩石熔融程度的影响——以黑云母片麻岩的动、静态熔融对比实验为例. 地质学报, 79(3): 338-341.
- 王嘉荫. 1978. 应力矿物. 北京:地质出版社, 220.
- 吴攀. 1999. 黔东南古金矿床矿体地质特征及控矿规律. 贵州工业大学硕士研究生论文.
- 吴学益, 钟德义, 梁宁, 王杰, 周文华, 耿建民. 1984. 构造地球化学高温高压模拟试验及其初步结果. 大地构造与成矿学, 8(3): 251-260.
- 吴学益, 钟德义等. 1986a. 构造地球化学(构造与成矿)实验研究. 地质地球化学, (11): 63-65.
- 吴学益, 钟德义, 周文华. 1986b. 万山汞矿形成的构造热动力作用及其模拟试验的初步研究. 见:中国科学院地球化学研究所成立二十周年地球化学论文集. 北京:科学出版社, 311-317.
- 杨开庆. 1982. 关于构造控岩控矿与构造成岩成矿问题. 地质力学论丛, (6): 9-19.
- 杨开庆. 1986. 动力成岩成矿理论的研究内容和方向. 地质力学研究所所刊, (7): 1-4.
- 杨元根, 吴学益, 金志升, 王子江. 2004. 海南二甲金矿的动力变形成矿作用及构造地球化学模拟实验研究. 大地构造与成矿学, 28(3): 320-329.
- 叶利谢夫 H A. 1963. 变质作用. 北京:地质出版社, 1966 年中译本:397.
- Chen Guoda. 1978. Methodology for study of metallogenic structures. Beijing: Geological Publishing House.
- Chen Guoda. 1982. Polygenetic compound ore deposits and their origin in the context of regularities in crustal evolution. *Geotectonica et Metallogenia*, 6(1): 33-55 (in Chinese with English abstract).
- Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources. 1987. Records of regional geology of Guizhou province. Beijing: Geological Publishing House.
- Ma Rui, Liu Zhenghong, Lu Guxian and Zhang Gang. 2005. Effect of differential stresses on the degree of melting: Case study of melting experiment of biotite gneiss. *Acta Geologica Sinica*, 79(3): 338-341 (in Chinese with English abstract).
- Harker A. 1932. Metamorphism - Study on rock transformation. Beijing: Geological Publishing House, Chinese translation version in 1981: 372.
- Lu Guxian. 1982. Study on structures of the Shicao copper ore field in Yanqing, Beijing. In: *Annals of Chinese Academy of Geological Sciences*. Beijing: Geological Publishing House, 192-194, 971-973.
- Lu Guxian and Kong Qingcun. 1993. Geology of Linglong - Jiaojia type gold deposition Jiaodong, Shandong. Beijing: Science Press, 1-253.
- Lu Huanzhang, Wang Zhonggang, Wu Xueyi, Chen Wenyi, Zhu Xiaoqing, Guo Dijiang, Hu Ruizhong and Moussa Keita. 2005. Geological structures in southeast Guizhou and their relationships with gold deposits. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 98-105.
- Ma Rui, Liu Zhenghong, Lu Guxian and Zhang Gang. 2005. Influence of differential stress status on the degree of melting of rocks - Take the comparative experiments of both dynamic and static melting of biotite gneiss as an example. *Acta Geologica Sinica*, 79(3): 338-341.
- Wang Jiayin. 1978. Stress minerals. Beijing: Geology Publishing House, 220.
- Wu Pan. 1999. Geological features of the Tonggu gold deposits in Qiandong, Guizhou and ore-controlling laws. M. Sc. thesis with Guizhou University of Industry.
- Wu Xueyi, Zhong Deyi, Liang Ning, Wang Jie, Zhou Wenhua and Geng Jianmin. 1984. Tectono-geochemical simulating experiments of high T and P and preliminary results. *Geotectonica et Metallogenia*, 8(3): 251-260 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xueyi, Zhong Deyi et al. 1986a. Tectono-geochemical (structures and metallogeny) experimental study. *Geology - Geochemistry*, (11): 63-65.
- Wu Xueyi, Zhong Deyi and Zhou Wenhua. 1986b. Preliminary

References:

Chen Guoda. 1960. Theory on activation of geoplatform and its significance for ore exploration. Beijing: Geological Publishing House.

- study on the tectono-thermal dynamics for the formation of Wanshan mercury deposits and simulation experiments. In: Collected geochemical works in celebration of the 20th anniversary of the founding of IGCAS. Beijing: Science Press, 311 – 317.
- Yang Kaiqing. 1982. On problems concerning rock – controlling and ore-controlling structures and rock-forming and ore-forming structures. *Collected Papers on Geomechanics*, (6): 9 – 19.
- Yang Kaiqing. 1986. Contents of research on dynamic rock-forming and ore-forming theories and their orientations. *Bulletin of CAGS – Institute of Geomechanics*, (7): 1 – 4.
- Yang Yuangen, Wu Xueyi, Jin Zhisheng and Wang Zijiang. 2004. Dynamic deformation – related ore-forming processes and tectono-geochemical simulating experiments of Erjia gold deposit, Hainan Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 28 (3): 320 – 329 (in Chinese with English abstract).
- Yelisev H A. 1963. Metamorphism. Beijing: Geological Publishing House, Chinese translation version in 1966: 397.

FEATURES OF ROCK-CONTROLLING AND GOLD ORE-CONTROLLING STRUCTURES IN THE JINGPING – TIANZHU REGION, SOUTHEASTERN GUIZHOU: SIMULATION EXPERIMENT AND MECHANICAL ANALYSES

WU Xueyi¹, LU Huanzhang^{1,2}, LU Guxian³, WANG Zhonggang¹,
HU Ruizhong¹, CHEN Wenyi⁴ and ZHU Xiaoqing¹

(1. Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, GZ 550002, China; 2. Department of Earth Sciences, University of Quebec, G7H 2B1, Canada; 3. Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China; 4. Guizhou Institution of Geology, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, Guiyang, GZ 550004, China)

Abstract: This paper was formulated based on the previous researches. The geological background and quartz-vein type gold deposits occur widespread in the Jingping – Tianzhu region, Southeastern Guizhou, here the ore-controlling structures of gold mineralization in the studied region were emphasized and a genetic model was established for these quartz-vein type gold deposits. Moreover, ore-forming simulating experiments were carried out, and the results show that: 1) Ductile deformation (fold) and brittle deformation (fault) took place under high-temperature and high-pressure conditions; 2) Ore-forming materials were activated, transported and enriched during deformation, and finally concordant and discordant gold-bearing quartz veins were formed. Multiple deformation during the simulation experiments help the ore-forming materials to be concentrated; 3) Formation of enriched orebodies in the axles of complex anticlines was finally resulted. The experimental results are consistent with the genetic model proposed for gold deposits in the studied region.

Through geomechanical analysis of the simulation experiments, the authors discovered that the axis pressure (b_1) can produce tectonic hydrostatic overpressure to enhance the enclosure pressure, and to promote rock deformation, materials migration and deposition as well as metallogenesis of mineralizing fluid at locations that show little tectonic overpressure. The experiments also show that the tectonic overpressure is an important condition for gold metallogenesis in the study area.

Keywords: gold mineralization; structural control; simulation experiment; Jingping – Tianzhu region; Guizhou



照片 1 GZ₀₁-21 粉砂质板岩(平秋),实验前矿物颗粒粗细相间成条带状,无明显变形。×30(+)

Photo 1 GZ₀₁-21 silty slate (Pingqiu). Note that prior to experiment mineral grains show band structure and no apparent deformation. ×30(+)



照片 2 GZ₀₁-21-1 粉砂质板岩(平秋),实验后呈弱塑性变形,发育不太明显的隐裂隙。×30(+)

Photo 2 GZ₀₁-21-1 silty slate (Pingqiu). Note that prior to experiment mineral grains show weak plastic deformation and development of inconspicuous fractures. ×30(+)

Test Temperature: 400°C; Axial pressure: 1500 MPa; Confining Pressure: 375 MPa; Time: 64h



照片 3 GZ₀₁-25 变余砂岩(同古),实验前矿物颗粒较细,大小均匀,无明显变形。×30(-)

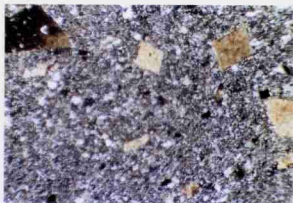
Photo 3 GZ₀₁-25 palimpsest sandstone (Tonggu). Note that prior to experiment mineral grains are fine-grained, showing homogeneous size distribution and no conspicuous deformation. ×30(-)



照片 4 GZ₀₁-25-5 变余砂岩(同古),实验后发育共轭 X 剪切裂隙。×30(-)

Photo 4 GZ₀₁-25-5 palimpsest sandstone (Tonggu). Note that after experiment mineral grains show development of conjugate X-shaped fractures. ×30(-)

Test Temperature: 560°C; Axial pressure: 2200 MPa; Confining Pressure: 550 MPa; Time: 120h



照片 5 BKS₍₁₎ 铁白云石化板岩(八克),实验前矿物大小轮廓清楚,无明显变形。×30(+)

Photo 5 BKS₍₁₎ ankeritized slate (Bake). Note that prior to experiment mineral grains show clearly defined configuration and no conspicuous deformation. ×30(+)



照片 6 BKS-2 铁白云石化板岩(八克),实验后裂隙明显,并切穿矿物,多为不规则交叉裂隙。×30(+)

Photo 6 BKS-2 ankeritized slate (Bake). Note that after experiment mineral grains show development of conspicuous fractures which cut across grains and generally occur in the form of irregular cross fractures. ×30(+)

Test Temperature: 560°C; Axial pressure: 1550MPa;
Confining Pressure: 387MPa; Time: 30h



照片 7 GZ₀₁-15₍₁₎ 变余砂岩(平秋),实验前矿物颗粒大小均匀,具棱角状,硫化物(黑色)星散分布无明显变形。×30(-)

Photo 7 GZ₀₁-15₍₁₎ palimpsest sandstone (Pingqiu). Note that prior to experiment mineral grains show homogeneous distribution of sizes, angular shapes, scattered distribution of sulfides and inconspicuous deformation. ×30(-)



照片 8 GZ₀₁-15-6 变余砂岩(平秋),实验后矿物颗粒圆滑,不规则裂隙发育,金硫化物(黑色)活化、迁移聚集充填在裂隙中。×30(-)

Photo 8 GZ₀₁-15-6 palimpsest sandstone (Pingqiu). Note that after experiment mineral grains show round configuration, development of irregular fractures, activation, migration, concentration and filling of gold sulfides in fractures. ×30(-)

Test Temperature: 560°C; Axial pressure: 2000MPa;
Confining Pressure: 500MPa; Time: 73h



照片9 GZ₀₂-12 粉砂质板岩(同古),实验前矿物颗粒细小,均匀,无明显变形。×30(+)

Photo 9 GZ₀₂-12 silty slate (Tonggu). Note that prior to experiment mineral grains show fine sizes, homogeneous size distribution and inconspicuous deformation. ×30(+)



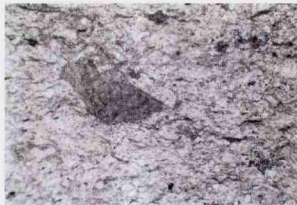
照片10 GZ₀₂-12-2 粉砂质板岩(同古),实验后发育顺层和穿层裂隙,金硫化物(黑色)沿裂隙充填。

实验温度:480℃;轴压:1650MPa;围压:410MPa;时间:32h

Photo 10 GZ₀₂-12-2 silty slate (Tonggu). Note that after experiment mineral grains show development of fractures along bedding or across bedding and filling of gold sulfides (black) along fractures.

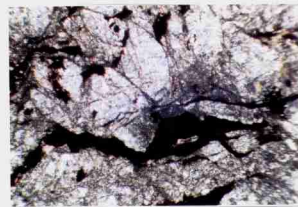
Test Temperature: 480℃; Axial pressure: 1650MPa;

Confining Pressure: 410MPa; Time: 32h



照片11 BK5₁₂₁ 铁白云石化板岩(八克),实验前矿物大小均匀,无明显变形。×30(-)

Photo 11 BK5₁₂₁ ankeritized slate (Bake). Note that prior to experiment mineral grains show homogeneous size distribution and inconspicuous deformation. ×30(-)



照片12 BK5-3 铁白云石化板岩(八克),实验后不规则裂隙发育,金硫化物(黑色)活化、迁移、聚集充填于裂隙中。×30(-)

实验温度:560℃;轴压:1500MPa;围压:375MPa;时间:67h

Photo 12 BK5-3 ankeritized slate (Bake). Note that prior to experiment mineral grains show development of irregular fractures and activation, migration, concentration and filling of gold sulfides in fractures. ×30(-)

Test Temperature: 560℃; Axial pressure: 1500MPa;

Confining Pressure: 375MPa; Time: 67h



照片 13 平秋镇红鑫金矿含金石英脉呈塑性流动状态沿顺层及穿层裂隙充填。(野外照片)

Photo 13 Gold-bearing quartz vein in Hongxin gold deposit in Pingqiu Town, showing filling in fractures along bedding or across bedding in plastic flowing status. (Field photo)



照片 14 GZ₀₂-12-2 粉砂质板岩(同古金矿), 实验后含金硫化物呈塑性流动状态沿顺层裂隙充填。 $\times 30(-)$

实验温度: 480°C; 轴压: 1650MPa; 围压: 410MPa; 时间: 32h

Photo 14 GZ₀₂-12-2 silty slate (Tonggu gold deposit). Note that after experiment gold-bearing sulfides show mineral grains show filling in fractures along bedding in plastic flowing status. $\times 30(-)$

Test Temperature: 480°C; Axial pressure: 1650MPa;

Confining Pressure: 410MPa; Time: 32h



照片 15 成矿模式野外照片 锦屏县城南红星桥头公路边岩壁上出现的剪切带-背斜-顺层石英脉三者在剖面上所反映出的关系, 就是黔东南锦屏-开柱地区石英脉型金矿成矿模式的具体表现。

Photo 15 Field photo showing metallogenic model. A combination of shear zone-anticline-bedding-parallel quartz vein occurs on rock walls along the highway at Hongxing Bridge in the south of Jinping County, and the relationship reflected in this profile is just the representation of the metallogenic model for the quartz-vein-type gold deposit in Jinping - Kaizhu of southeast Guizhou.



照片 16 GZ04-21-4 变余砂质板岩(平秋红鑫金矿) 实验后塑性变形形成褶曲, 含金硫化物和石英脉沿褶曲轴部充填。

实验温度: 400°C; 轴压: 1450MPa; 围压: 360MPa; 时间: 12h

Photo 16 GZ₀₄-21-4 palimpsest sandy slate (Hongxin gold deposit in Pingqiu). Note that after experiment mineral grains show formation of flexures after plastic deformation and gold-bearing sulfides and quartz veins show filling at axes of flexures.

Test Temperature: 400°C; Axial pressure: 1450MPa;

Confining Pressure: 360MPa; Time: 12h