卷(Volume)35,期(Number)4,总(SUM)131
页(Pages) 618~627,2011,11(November,2011)

大地构造与成矿学
Geotectonica et Metallogenia

新城金矿蚀变带构造与地球化学特征

吕承训[1],吴淦国[1],陈小龙[2],张迎春[1],张迅与[1],赵海[3]
(1.中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院,北京 100083; 2.湖南有色地勘局 二四七队,湖南 长沙 410129; 3.山东黄金矿业股份有限公司 新城金矿,山东 莱州 261438)

摘 要:通过新城金矿的构造和蚀变岩剖面实测、构造测量和岩石地球化学分析,获得以下构造和岩石地球化学同步变化特点:(1)以焦家断裂为中心蚀变岩分带为断层泥-硅化带-黄铁绢英岩带-强钾化花岗岩带-弱钾化花岗岩带-未蚀变花岗岩带;(2)金矿化主要集中在硅化带及黄铁绢英岩带;(3)断裂下盘依次发育糜棱岩-碎裂岩-花岗质碎裂岩-碎裂花岗岩的构造岩分带;(4)构造测量显示,断裂下盘各蚀变带的构造主压应力依次显示东西向、北西向、北西向和北北西向,而蚀变岩石差应力分别为 107.46 MPa、135.58 MPa、115.21 MPa 和 86.75 MPa,正常似斑状花岗岩仅 71.56 MPa 的变化趋势;(5)蚀变带岩石常量元素分析揭示,Fe_2O_3、CaO、FeO、H_2O、CO_2 的迁移量较大且与 Au 元素变化同步,明显在弱钾化花岗岩带向强钾化花岗岩带过渡地段变化量最大;微量矿化元素 Au、Ag、Zn、As、Bi、Cu 和 Pb 在蚀变过程中处于迁入状态,且在钾化和绢云母化强烈发育带迁入量最大。

野外构造测量、室内岩石学观测和岩石化学测试结果充分说明,新城金矿的热液蚀变成矿过程与构造应力场的分布变化密切相关,揭示成矿元素富集强度与构造的强弱有一定相关性,在北西方向挤压且构造应力处于较高强度阶段,伴随强烈绢云母化和钾长石化蚀变而元素集中富集成矿。

关键词:新城金矿;蚀变分带;构造岩分带;应力分带;地球化学分带
中图分类号:P614; P595 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-1552(2011)04-0618-010

0 引 言

胶东地区面积仅占全国陆地面积的0.17%,但黄金资源储量占全国近四分之一,是我国最大的金矿集中区(宋明春等,2010)。区内密集分布着胶西北、栖-蓬-福、牟-乳三个二级矿集区。新城金矿是胶西北地区典型的超大型蚀变岩型金矿床,主要与中生代花岗岩岩浆期后热液有关,在世界金矿床类型中独具特色。新城金矿的成因类型属中温热液型细脉浸染交代蚀变岩金矿床,矿化蚀变类型为黄铁绢英岩型。自发现以来,前人在该地区展开了大量研究工作(吴淦国,1998; 王华东等,1999; 李俊英,2001; 张存勇,2002; 赵海等,2004; 陈小龙,2010①)对新城金矿矿体分布规律进行了总结,对矿区的围岩蚀变类型进行了初步探讨和归纳,为矿区地质找矿工作打下了坚实基础。

新城金矿构造分带和矿化蚀变分带明显,同时显示出岩石地球化学元素具有同步变化的趋势(李士先等,2007)。但是,关于新城金矿构造-地球化学分带性的研究,尚缺乏具体的观测和分析。本文论述了新城金矿构造岩的分带特征、应力变化趋势,分析了蚀变带分带特征以及地球化学元素迁移规律。

收稿日期:2010-09-21; 改回日期:2011-06-27
项目资助:国家自然科学基金(编号:40972061)、矿床地球化学国家重点实验室项目(编号:200803)、全国危机矿山接替资源找矿项目(编号:200799095)资助。
第一作者简介:吕承训(1987-),男,硕士研究生,构造地质学专业。Email:lvchengxun@126.com
①陈小龙. 2010. 胶东新城金矿控矿构造解析及分形动力学研究. 西安:长安大学硕士论文:8-89.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　矿区地质特征

新城金矿处于渤海莱州湾滨海地区。区内地面主要被第四系覆盖,地层简单。基岩为岩浆岩类,下元古界－太古界胶东岩群变质岩在岩浆岩中呈残留体出现,零星分布。

新城金矿区岩浆岩比较发育,主要由玲珑型似片麻状中细粒二长黑云母花岗岩和郭家岭型似斑状花岗闪长岩组成,还发育各类脉岩。似片麻状中细粒二长黑云母花岗岩为浅肉红色,中粒花岗结构,块状构造; 矿物主要成份为: 正长石 35%,斜长石 28%,石英 30%,黑云母 3%,白云母 2%,含少量方解石; 矿物粒径 2～4 mm,多分布于焦家断裂上盘。多数研究者认为郭家岭型花岗闪长岩是主要成矿岩体。郭家岭型似斑状花岗闪长岩为肉色或灰红色,粗粒似斑状结构,块状构造; 矿物中的斑晶主要由正长石组成,常呈巨晶出现,粒径可达 1～3 cm; 基质中含斜长石 50%,石英 25%,黑云母 5%。各类脉岩主要赋存于焦家断裂下盘,发育有闪长玢岩、花岗闪长玢岩、花岗玢岩、石英玢岩及闪斜煌斑岩脉等(姚凤良,1991)。

新城金矿发育在焦家断裂带中(图 1)。焦家断裂带是矿区和矿田的一级控矿构造(吴淦国,1998; 吕古贤等,2007)。焦家断裂宽 100～200 m,沿北东方向展布,倾向北西,倾角 26°～30°,局部断层变陡,倾角达 70°左右。矿区内还发育有不同级别、不同序次的断裂构造。这些断裂构造大多直接控制了矿区内的各含矿蚀变带,使区内的金矿床与断裂带有密切的成生关系(钱建平等,2011)。新城金矿矿体受到断裂构造控制明显。富矿段的走向与次级构造的走向基本一致(姚凤良等,1990)。次级构造主要分为 NNE 向和 NEE 向断裂构造,前者走向 10°～30°,倾向北西,倾角在 60°～70°; 后者走向 65°～85°,倾向北西,倾角 55°～80°,较为发育,密度较大。

新城金矿的矿化蚀变严格受焦家断裂带控制(图 2)。破碎蚀变带在矿区内延伸 2100 m,宽约 70～150 m,井下最宽处可见达到 175 m,实际蚀变带可能更宽,总体走向 30°～45°,倾向北西,北段倾角 20°～30°,中段倾角 35°～47°,南段倾角 24°～36°。沿主裂面发育有 5～40 cm 厚的连续而稳定的断层泥。蚀变强度从主裂面向两侧逐渐减弱。矿化程度与蚀变强度有一定的相关性,新城金矿的 X、I、V 号主矿体赋存于主断裂面下盘的黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩带及黄铁绢英岩化碎裂岩带内。

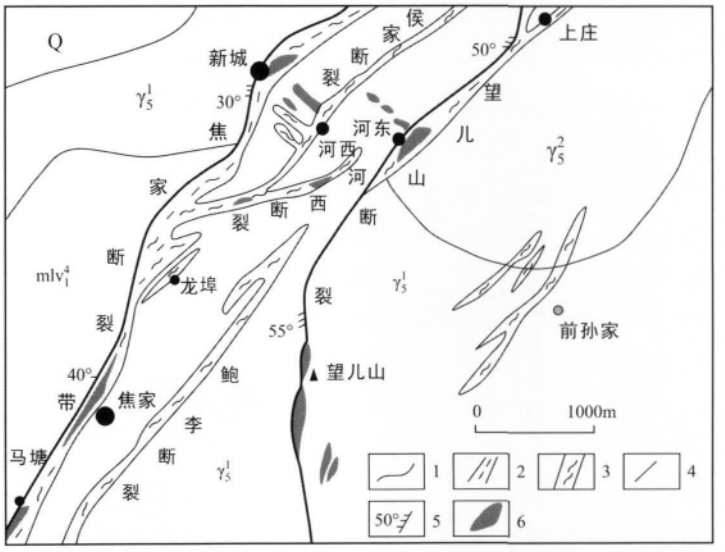
2　新城金矿构造－蚀变－矿化分带特征

2.1　蚀变岩分带

从断裂带向下盘(图 2,表 1),主要蚀变类型及特征如下:

(1) 碳酸盐化: 包括高岭土化和水云母化等泥化,分布广泛,相对集中发育于断裂带附近。碳酸盐化呈粒状交代长石及暗色矿物,零散分布并常见以细脉状及网状穿切于蚀变带中,其脉状体以方解石为主,伴有少量石英、重晶石等,呈它形粒状,颗粒大小为 1 mm 左右。

(2) 硅化: 多发育在矿化蚀变带的中心部位,靠近控矿断裂带。除原岩残留的石英外,硅化物质来源主要分为两种,一类是由长石绢云母化分解出来的硅质; 另一类则是由热液携带的硅质。硅化有多



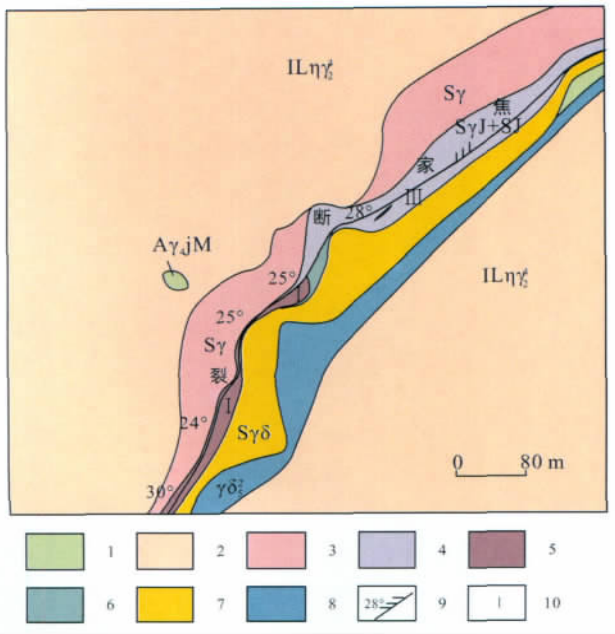
1. 地质界限; 2. 早期控矿断裂蚀变带; 3. 中期成矿蚀变带; 4. 成矿后断裂; 5. 断裂及产状; 6. 金矿体; Q. 第四系; γ_5^2. 郭家岭花岗闪长岩; γ_5^1. 玲珑黑云母花岗岩; mlv_1^4. 马连庄超单元变辉长岩。

图 1　焦家矿田地质图(据庞绪成,2005②修改)

Fig. 1　Geological map of the Jiaojia gold orefield

②庞绪成. 2005. 山东焦家金矿矿床地球化学特征及深部矿体预测研究. 成都: 成都理工大学硕士论文.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



1. 胶东岩群苗家岩组; 2. 玲珑型弱片麻状中细粒含石榴二长花岗岩; 3. 绢英岩化花岗岩; 4. 绢英岩化花岗闪长岩; 5. 黄铁绢英岩化花岗闪长岩; 6. 绢英岩化花岗质碎裂岩; 7. 绢英岩质碎裂岩; 8. 黄铁绢英岩质碎裂岩; 9. 焦家断裂及产状; 10. 矿体编号。

图2 新城金矿构造－蚀变和矿化分布略图

Fig. 2 Map showing the distribution of tectonic-alteration and mineralization in the Xincheng gold deposit

期作用: 早期的石英呈颗粒状或团粒状,集合体呈脉状或不规则团块状出现; 成矿期的石英呈灰白或烟灰色,以细脉或硅质条带出现,并多伴有硫化物产出; 晚期则与方解石伴生,以石英－方解石或单独石英细脉的形式产出。

(3) 黄铁矿化: 集中分布于黄铁绢英岩带中,接近硅化带。黄铁矿化是多次作用的产物,常与绢云母化、硅化在空间上相互叠加和紧密伴生,与金矿相关程度高。黄铁矿化程度较高处,常构成金矿赋存点。黄铁矿多呈细粒自形半自形稠密浸染状产出。

(4) 绢云母化: 是黄铁绢英岩带和钾化带的主要蚀变作用,与矿化带密切共生。岩石受热液作用长石被水化分解,形成细鳞片绢云母,并伴有 SiO_2 析出,形成显微粒状石英,即通称为绢英岩化。岩石中的暗色矿物角闪石、黑云母,由水化蚀变铁镁被带出,形成绿泥石,再蚀变为绢云母。蚀变强烈时,石英受到熔蚀,发生去硅作用,形成单一绢云母。绢云母化在区内极为普遍,蚀变强度随构造发育程度而变化,构造发育处绢云母化程度较高,反之则变弱,主要发育于主构造产生的糜棱岩、碎裂岩带中。蚀变带中心绢云母化强烈,两侧逐渐变弱。

(5) 钾长石化: 也称钾化,位于蚀变岩的边部,形成较早。岩石普遍呈鲜艳的肉红色,一部分是钾交代的结果,大多数是长石类矿物(微斜长石、斜长石),少数为条纹长石化; 微斜长石沿斜长石双晶面及裂隙呈脉状、网状交代,有时斜长石被钾长石交代呈孤岛状。钾长石交代斜长石形成交代蠕英结构。这是热液成矿阶段早期在氧化条件下伴随构造作用形成的。钾长石化在焦家断裂下盘较为发育。

新城金矿的蚀变岩分带性明显,其主要特征为: 以焦家主断裂为中心,向下盘依次为断层泥－硅化带－绢英岩化带－强钾化花岗岩带－弱钾化花岗岩带－未蚀变花岗岩带。金矿化主要集中在硅化带及绢英岩带中。

空间分布上,钾长石化蚀变范围较宽,分布于蚀变带外围,反映了早期含矿热液活动范围。绢英岩化、黄铁绢英岩化受到主构造、次级构造控制,主要发育于糜棱岩、碎裂岩带中,稍晚于钾化带形成,发育在蚀变岩内侧。硅化受到裂隙、节理裂隙带控制,多沿裂隙成线状或网脉状分布,主要发育于矿化蚀变程度较高的矿体主要赋存部位,如Ⅴ号矿体各蚀变带中,也常与绢云母化、钾长石化叠加出现。

从时间上看,通过实际地质观察可以发现,钾长石常见被绢云母、石英、黄铁矿细脉穿插,说明钾长石化发生要早于其他蚀变类型,为成矿早期的高温蚀变。硅化贯穿了整个热液活动始终,但是在晚于钾化的脆性变形阶段发育,直接与成矿作用相关。

2.2 构造－蚀变－矿化分带特征

综上并结合矿化分带分析,初步归纳新城金矿构造岩分带及矿化蚀变特征如表1。

焦家断裂是新城金矿的主要导矿储矿构造。矿区内大规模蚀变的主要原因是晚期压性、脆性断裂活动及热液活动对早期韧性剪切作用形成的构造岩叠加改造的结果。含矿热液沿断裂构造、节理裂隙带通过扩散、渗滤的交代方式对构造岩发生蚀变交代作用,形成一系列构造－蚀变岩分带现象。

新城金矿的蚀变带分布特征、岩石碎裂程度和蚀变强度均与和焦家主断裂的距离相关,随着与主断裂间距增加,岩石碎裂程度、蚀变强度及相关矿化程度均逐渐降低。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　新城金矿构造岩分带及矿化蚀变特征

Table 1　Tectonic-rock zone and characteristics of mineralized alteration of the Xincheng gold deposit

	非矿地段构造岩分带	名称	矿化强度	结构构造	蚀变特征	矿化特征
断裂带上盘	黑云母花岗岩	黑云母花岗岩	无工业矿化			
	碎裂花岗岩带	绢英岩化花岗岩		变余碎裂花岗结构,块状构造	微弱绢云母化、硅化及星散状黄铁矿化	矿化特征不明显
	花岗质碎裂岩带	绢英岩化花岗质碎裂岩		变余碎裂花岗结构,斑杂状构造及块状构造		
	碎裂岩带	绢英岩质碎裂岩		变余碎裂结构,斑杂状构造		
断层	断层泥	断层泥			蚀变微弱,硅化	
断裂带下盘	糜棱岩(角砾岩)带	黄铁绢英岩	工业矿体	变余糜棱结构,条带状构造	主要为硅化、黄铁矿化和绢云母化 主断裂附近硅化现象较为明显 与断层间距增加,工业矿体的黄铁绢英岩化逐渐减弱	侵染状矿化
	碎裂岩带	黄铁绢英岩质碎裂岩		变余碎裂结构,斑杂状构造		斑点状及短脉状矿化
	花岗岩质(花岗闪长质)碎裂岩带	黄铁绢英岩化花岗岩(花岗闪长岩)质碎裂岩		变余碎裂结构,斑杂状构造及网脉状构造		细脉侵染状矿化
	碎裂花岗岩(花闪长岗岩)带	黄铁绢英岩化(或绢英岩化)花岗岩(花岗闪长岩)		变余碎裂结构,块状构造及网脉状构造		网脉状矿化
	花岗岩(花岗闪长岩)	花岗岩(花岗闪长岩)			出现绢云母化及钾长石化,随着与主断裂距离增加,渐变为黑云母花岗岩或似斑状花岗闪长岩	

3　新城金矿蚀变矿化分带的观测和分析

新城金矿围岩蚀变发育,其规模和强度决定于构造规模、岩石性质和热液活动强度(吕古贤等,1999)。蚀变类型主要有硅化、黄铁矿化、绢云母化、钾长石化、碳酸盐化,局部有绿泥石化,同时伴有金属硫化物和金银矿化,具有蚀变分带特征(图 2)。

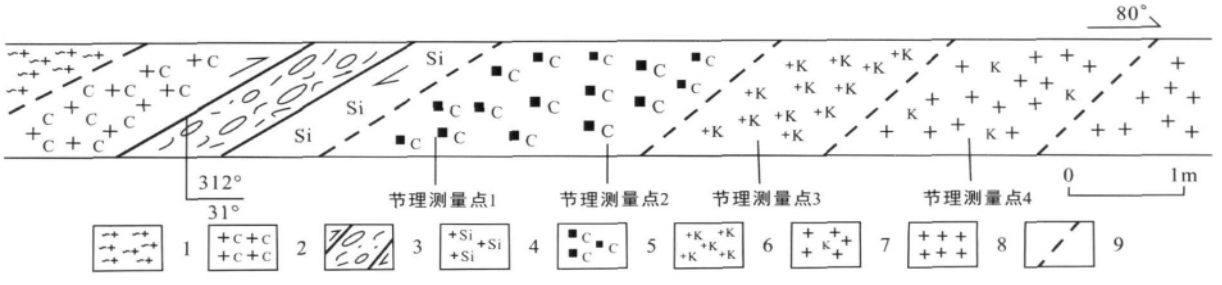
新城金矿的主要控矿构造为焦家断裂带。矿体的近矿围岩顶板为黑云母花岗岩,底板为似斑状花岗闪长岩,焦家断裂沿二者接触带通过。焦家断裂中糜棱岩、次糜棱岩带发育,且与碎裂岩、角砾岩相互叠加产出(吕古贤等,1999,2001)。

控矿断裂是新城金矿的主要导矿储矿构造(表 1)。含矿热液沿断裂构造、节理裂隙带以扩散、渗滤的方式对围岩发生蚀变交代作用,形成一系列蚀变矿化类型,如: 钾长石化、绢云母化、硅化、黄铁矿化和碳酸盐化等。

3.1　构造岩分带的观测

本次实测剖面进一步表明,构造岩分带具有一定规律,且与矿化蚀变分带有密切的相关性(图 3)。

总体来讲,从焦家主断裂面向下盘依次为断层泥 - 糜棱岩 - 碎裂岩 - 花岗质碎裂岩 - 碎裂花岗岩,水平分带明显,总宽度为 80 ~ 150 m。焦家断裂



1. 黑云母花岗岩; 2. 绢英岩化花岗岩; 3. 断层及断层泥; 4. 硅化带; 5. 黄铁绢英岩带; 6. 强钾化花岗岩带; 7. 弱钾化花岗岩带; 8. 未蚀变花岗岩带; 9. 岩性分界线。

图 3　新城金矿 137 勘探线 - 530 m 中段实测剖面图

Fig. 3　Measured geological section of 137 profile at - 530 m level in the Xincheng gold deposit

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

具有长期活动的特点，早期形成的糜棱岩钾化花岗岩带，后来被热液再胶结，形成黄铁绢英化花岗碎裂岩带，晚期脆性变形叠加形成硅化黄铁矿化带。

(1) 断层泥：灰－深灰色，糜棱结构及泥质结构。成分主要有黏土物、糜棱物、石英等。具强黏性及塑性，挤压片理明显，局部有挠曲，或发生小褶皱，有时见石英或角砾分布于“片理”中，构成眼球状。为主断裂面的判别标志，厚5～20 cm。

(2) 糜棱岩带：新城金矿糜棱岩带主要岩性为黄铁绢英岩，多为浅灰到灰绿色，主要矿物成分为石英和绢云母，副矿物为黄铁矿，微量的方铅矿、黄铜矿。显微鳞片状花岗变晶结构、变余糜棱结构，块状构造。

(3) 碎裂岩带：主要岩性为黄铁绢英质碎裂岩，多为灰及深灰绿色，变余碎裂结构、变余糜棱结构，斑杂状构造。主要成分有石英、绢云母、碳酸盐矿物、糜棱物和黄铁矿。原岩在强烈应力作用下，矿物严重破碎，大部分矿物碎成细小的糜棱物，其中夹有未完全破碎的钾长石、斜长石、石英等。该蚀变岩石分布于断裂面的下盘，是主要的含矿岩石之一。

(4) 花岗质碎裂岩带：多为黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩，主要为浅灰到淡灰绿色，矿物成分为石英、绢云母及残留长石等，多保留部分原岩成分。变余碎裂结构，块状构造及斑杂状构造。

(5) 碎裂花岗岩带：岩性多为绢英岩化碎裂花岗岩及钾化碎裂花岗岩，淡灰绿色－淡肉红色，变余碎裂花岗结构，块状构造。矿物主要成分为钾长石、斜长石、绢云母及石英等，强硅化、绢云母化及钾长石化现象普遍。岩石受轻微应力作用，表现在钾长石、石英具波状消光，沿裂隙及边部有破碎矿物的颗粒。

3.2 蚀变带构造测量和应力分析

3.2.1 蚀变带构造测量

新城金矿节理比较发育，其发育程度与和主断裂之间的距离相关。与主断裂间距越小，节理密集程度越高，岩石破碎程度越高。节理发育程度直接影响到成矿的规模和产状。构造蚀变岩带节理测量结果如表2。

表2 －530 m中段节理裂隙统计表

Table 2 Statistics of the joint fissure of －530 m level

编号	观测点岩性	观测点位置
节理测量点1	黄铁绢英岩	－530 m中段137穿，主断裂面
节理测量点2	黄铁绢英岩质碎裂岩	－530 m中段137穿，距主断裂东南25 m处
节理测量点3	强钾化碎裂花岗岩	－530 m中段137穿，距巷口10 m处
节理测量点4	弱钾化花岗岩	－530 m中段137穿，巷口向南5～10 m

各构造观测点节理的平均裂隙率在1.1%左右，最大裂隙率为3.3%。根据实地观测，靠近主断裂面节理会相对密集，远离主断裂面节理密度相应减小。就蚀变分带来看，硅化带因富含SiO_2，岩石能干性较好，岩石脆性破碎强烈，节理发育密集，而绢英岩化带因岩石中含有较多绢云母和绿泥石等软矿物，而使其在宏观露头上的成规模的节理发育不明显，但其内部的细小裂隙，微裂隙相当发育，从强钾化花岗岩带到弱钾化花岗岩带，岩石破碎减弱，节理密度减小。

137号勘探线－530 m中段实测剖面的4个节理测量点的玫瑰花图见图4。

随着与主断裂面距离的增加，节理由密集分布由NNE向渐变为NNE-NEE向。黄铁绢英岩测量点的主要节理发育方向为NNE；黄铁绢英岩质碎裂岩处，节理发育方向为NE；强钾化碎裂花岗岩测量点和弱钾化花岗岩测量点则渐变为共轭节理带密集显示NEE方向。根据节理分布的特征，可以发现构造蚀变岩带从外部到中心，从早到晚，主压应力的方向发生了变化，即从NNW渐变为NW向，最终在靠近主断裂处转变为近EW向挤压。

节理统计结果表明构造蚀变带的变形有从脆性变形向韧性变形变化的总体趋势。

3.2.2 蚀变带差应力分析

本文采用测量动态重结晶颗粒大小的方法来计算构造蚀变岩带的构造差应力大小。动态重结晶的粒度越小，意味着岩石的应变越强。前人根据金属试验的结果，找到了差应力与应变的关系，从而建立了差应力与动态重结晶粒度之间的关系。Goetze and Kohlstedt(1977)给出石英的计算公式，d的单位为mm，差应力单位为MPa：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 11 d^{-0.5}$$

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

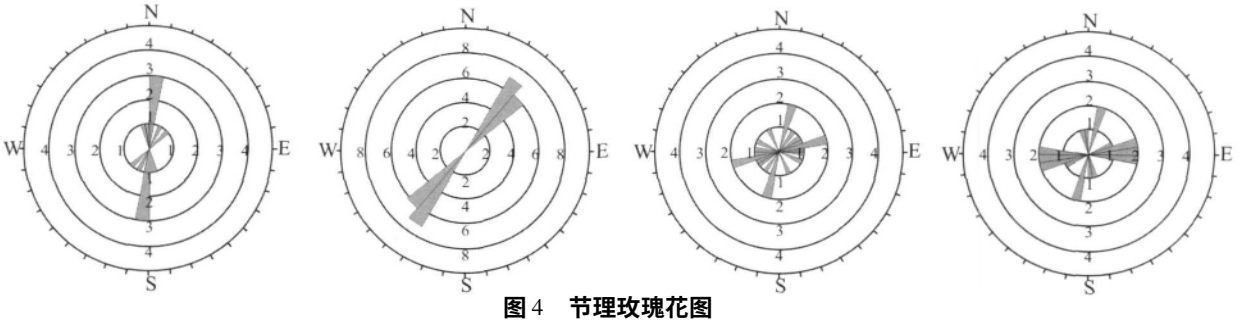


图 4　节理玫瑰花图

Fig. 4　Rose diagrams of the joints

表 3　动态重结晶测量差应力值表

Table 3　The ancient stress values measured through dynamic recrystallization grain method

编号	岩性	亚颗粒粒径 d	Twiss 公式	Goetze 公式	差应力值 $\Delta\sigma$	差应力均值
1ac	黄铁绢英岩	0.035	54.78	160.59	107.69	107.46
1bc		0.035	55.26	159.20	107.23	
2ac	绢英岩化碎裂花岗岩	0.026	67.15	203.80	135.48	135.58
2bc		0.026	66.87	204.49	135.68	
3ac	钾化花岗岩	0.031	63.02	175.63	119.33	115.21
3bc		0.034	56.01	166.16	111.09	
4ac	弱钾化花岗岩	0.077	37.43	85.40	61.42	86.75
4bc		0.033	56.99	167.19	112.09	
5ac	斑状花岗岩	0.070	34.41	92.49	63.45	71.56
5bc		0.052	41.75	117.57	79.66	

注: 颗粒粒径 d 的单位为 mm,差应力值 $\Delta\sigma$ 的单位为 MPa。

Twiss(1977)给出的石英计算式应用更广一些:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 5.56 d^{-0.68}$$

前人研究认为,Twiss 公式所测值偏小,而 Goetze 公式所测值则偏大。本文为尽量减小误差,在分别用两种公式对重结晶颗粒测算压力值的基础上,求二者的均值,从而获得误差相对较小的差应力值(表 3)。应用这样的方法对新城金矿不同构造点的动态重结晶颗粒进行了测量,颗粒粒径 $d = 1.5L/N$。L 为随机直线的总长度,N 为随机直线所截亚颗粒的总数。

以上结论与吕古贤和孔庆存(1993)关于焦家金矿Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号矿体用石英位错密度方法获得的古差应力的变化趋势相吻合。

从差应力值的分布来看(图 5),接近主断裂的黄铁绢英岩带的差应力值并非最大值,而相对距离主断裂较远一些的绢英岩化碎裂岩带的差应力值最大。这种现象被认为是一种水化作用的结果,或者是一种应变软化现象(刘瑞珣,1988)。这一现象说明,断裂既是构造应力集中和强烈活动部位,也是热液易于富集运移的地带。

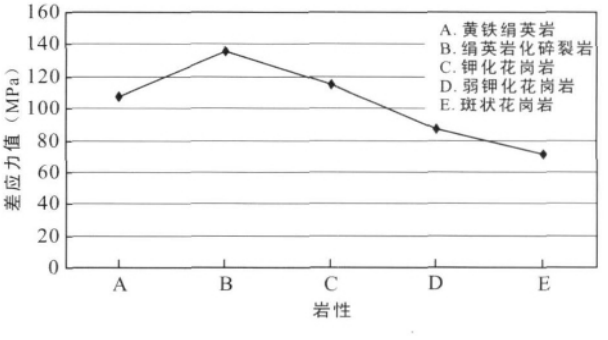


图 5　新城金矿蚀变带差应力变化趋势图

Fig. 5　Stress variation of the altered-rock zone in the Xincheng gold deposit

4　蚀变带岩石地球化学分析

4.1　岩石常量元素分布特征和变化

新城金矿构造蚀变岩带岩石化学成分分析结果(表 4)显示,各蚀变岩带普遍富含 SiO_2 和 Al_2O_3,两

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表4 新城金矿全岩分析结果表(%)

Table 4 Petrochemical result (%) of the altered-rock zone in the Xincheng gold orefield

样品号	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	MnO	P_2O_5	TiO_2	H_2O	CO_2	Total
XC001	74.18	13.64	0.10	1.15	0.15	1.54	2.60	4.10	0.117	0.035	0.126	0.81	1.29	99.84
XC002	70.40	12.97	0.39	1.71	0.16	3.09	1.83	4.57	0.226	0.018	0.082	0.73	3.41	99.59
XC003	71.68	14.08	0.92	1.00	0.38	2.72	0.06	4.69	0.112	0.031	0.140	2.15	2.20	100.16
XC005	68.02	13.57	1.17	1.05	0.34	4.01	1.16	4.44	0.191	0.045	0.148	2.20	3.32	99.65
XC006	71.20	14.13	0.03	0.76	0.18	1.95	1.93	6.20	0.092	0.030	0.124	0.96	1.71	99.30
XC007	70.16	15.75	0.07	1.05	0.24	1.23	2.42	6.00	0.095	0.082	0.288	0.97	0.93	99.28
XC008	70.89	15.29	0.02	0.91	0.24	1.54	2.67	6.26	0.031	0.053	0.188	0.34	1.10	99.53
XC009	70.83	15.65	0.38	1.08	0.47	0.99	1.23	6.64	0.071	0.069	0.274	1.16	0.86	99.71
XC017	72.68	15.34	0.13	1.20	0.31	1.70	3.22	3.99	0.054	0.053	0.204	0.28	0.59	99.76

注:(1)上表数据测试单位为中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所;(2) XC017,XC009为未蚀变花岗岩;XC006,XC007,XC008为弱钾化花岗岩;XC001,XC002为强钾化花岗岩;XC003,XC005为绢英岩。

者占全部成分的86%以上,其次是K_2O和Na_2O,含量最低的是MnO和P_2O_5,不同蚀变岩带中成分变化较大的是CO_2、H_2O、Na_2O和CaO,变化较小的为Al_2O_3和FeO。

蚀变矿化过程中组分的得失研究,有助于认识元素的地球化学性状及热液作用的性质、强度和成矿环境(丁式江和翟裕生,2000;张可清和杨勇,2002;高帮飞等,2006)。本文应用张可清和杨勇(2002)的质量平衡公式,计算获得了新城金矿构造蚀变岩带化学元素的变化情况(表5、图6)。

$$T_i = W_{id} \times M_d - W_{ip} = W_{id} \times W_{jp} / W_{jd} - W_i$$

式中:T_i为成分i在岩石发生物质变化过程中迁入或迁出原岩的总质量或总量(单位g或mol);M_d为测试岩石的总质量;W_{ip},Wd_{id}分别为原岩和测试岩中i成分的质量分数;W_{jp},W_{jd}分别为不活动成分j在原岩和子岩中的质量分数;原岩总质量假设为1。

A阶段:即从未蚀变花岗岩带到弱钾化花岗岩带,主要迁入成分为CaO,Na_2O,K_2O,MnO,H_2O,CO_2,其中迁入量最大的为CO_2。主要迁出成分为SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3,FeO,MgO,P_2O_5,TiO_2,其中迁出量最大的为Fe_2O_3。

B阶段:即从弱钾化花岗岩带到强钾化花岗岩带,主要迁入成分为SiO_2,Fe_2O_3,FeO,MgO,CaO,MnO,H_2O,CO_2,其中迁入量最大的为Fe_2O_3。主要迁出成分为Na_2O,K_2O,P_2O_5,TiO_2,其中迁出量最大的为TiO_2。

C阶段:即从强钾化花岗岩带到绢英岩带,主要迁入成分为Fe_2O_3,FeO,MgO,CaO,K_2O,MnO,

表5 新城金矿构造蚀变岩带成分(%)迁移表

Table 5 Component (%) migration of tectonic-altered rock zone in the Xincheng gold deposit

构造带蚀变带	未蚀变花岗岩带	未蚀变花岗岩带→弱钾化花岗岩带(A阶段)			弱钾化花岗岩带→强钾化花岗岩带(B阶段)			强钾化花岗岩带→绢英岩带(C阶段)		
化学成分 \ 参数	W_B	W_B	T_i 加入(+)带出(-)	T_i(%)(改变量/未蚀变花岗岩)	W_B	T_i 加入(+)带出(-)	T_i(%)(改变量/弱钾化花岗岩)	W_B	T_i 加入(+)带出(-)	T_i(%)(改变量/强钾化岩)
SiO_2	71.755	70.750	-1.005	-1.401	71.100	+0.350	+0.495	71.040	-0.060	-0.084
Al_2O_3	15.495	15.057	-0.438	-2.827	13.605	-1.452	-9.643	13.525	-0.080	-0.588
Fe_2O_3	0.255	0.040	-0.215	-84.314	0.635	+0.595	+1487.500	0.655	+0.020	+3.150
FeO	1.140	0.907	-0.233	-20.439	1.100	+0.193	+21.279	1.355	+0.255	+23.182
MgO	0.390	0.220	-0.170	-43.590	0.245	+0.025	+11.364	0.270	+0.025	+10.204
CaO	1.345	1.573	+0.228	+16.952	2.775	+1.202	+76.414	2.905	+0.130	+4.685
Na_2O	2.225	2.340	+0.115	+5.169	1.880	-0.460	-19.658	0.945	-0.935	-49.734
K_2O	5.315	6.153	+0.838	+15.767	4.270	-1.883	-30.603	4.630	+0.360	+8.431
MnO	0.063	0.073	+0.010	+15.873	0.154	+0.081	+110.959	0.169	+0.015	+9.740
P_2O_5	0.061	0.055	-0.006	-9.836	0.040	-0.015	-27.273	0.025	-0.015	-37.500
TiO_2	0.239	0.200	-0.039	-16.318	0.137	-0.063	-31.500	0.111	-0.026	-18.978
H_2O	0.720	0.757	+0.037	+5.139	1.505	+0.748	+98.811	1.440	-0.065	-4.319
CO_2	0.725	1.247	+0.522	+72.000	2.305	+1.058	+84.844	2.805	+0.500	+21.692

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

CO_2，其中迁入量最大的为 FeO。主要迁出成分为 SiO_2，Na_2O，P_2O_5，TiO_2，H_2O，其中迁出量最大的为 Na_2O。

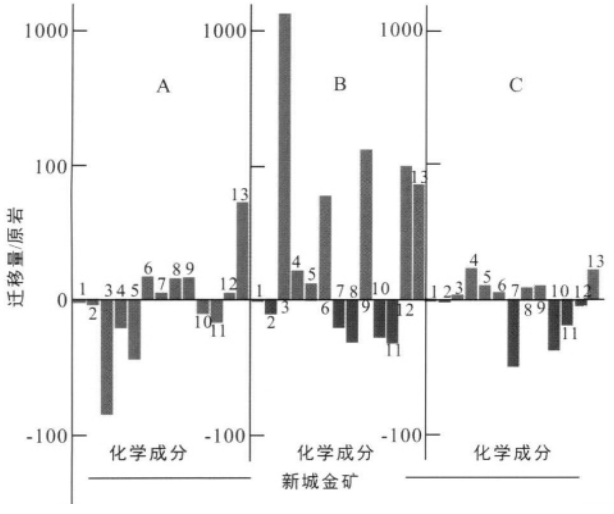
在所有迁移的化学成分中 Fe_2O_3、CaO、FeO、H_2O、CO_2 的迁移量较大且与 Au 元素变化趋势相似，说明这四种成分与 Au 元素相关性最强。总体来看在未蚀变花岗岩带到弱钾化花岗岩带和强钾化花岗岩带到绢英岩带过程中都是半数化学成分迁出和迁入，在弱钾化花岗岩带到强钾化花岗岩带中则大部分化学成分处于迁入状态。根据对比迁移量相对于组分总量的百分比可以发现，Fe_2O_3 是所有成分中最活跃的组分，其迁移百分比最高达到了 1487.5%；Fe_2O_3 在绢英岩带和强钾化带中主要为迁入，弱钾化带中为迁出。Na_2O、P_2O_5、TiO_2和 H_2O 四种成分一直处于迁出状态。SiO_2 含量十分稳定，在蚀变带和未蚀变带中变化量很小，其原因为 SiO_2 总体含量较高。

在化学元素迁移的过程中，以弱钾化花岗岩带到强钾化花岗岩带中迁移量变化程度最高，而从强钾化花岗岩带至绢英岩带迁移量不高。从图 5、图 6 可以发现，应力差值与上述主量组分的迁移活化相关性较好。绢英岩化带与弱钾化带的差应力值明显偏小，而在 C 阶段的元素迁移量也较小。

4.2　微量元素分布变化特征

新城金矿构造蚀变岩带微量元素分析结果见表 6 及图 7。

分析结果显示，蚀变岩带与未蚀变花岗岩的微量元素含量变化趋势具有一定的相似性，但蚀变带



1. SiO_2; 2. Al_2O_3; 3. Fe_2O_3; 4. FeO; 5. MgO; 6. CaO; 7. Na_2O; 8. K_2O; 9. MnO; 10. P_2O_5; 11. TiO_2; 12. H_2O; 13. CO_2; A 阶段: 未蚀变花岗岩带→弱钾化花岗岩带; B 阶段: 弱钾化花岗岩带→强钾化花岗岩带; C 阶段: 强钾化花岗岩带→绢英岩带。

图 6　新城金矿围岩蚀变过程的化学组分迁移图

Fig. 6　Diagram showing the mass balance for the wall rock alteration in the Xincheng gold deposit

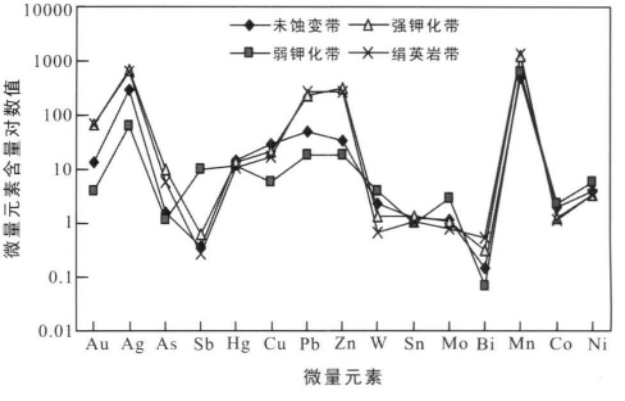


图 7　新城金矿蚀变带微量元素变化趋势图

Fig. 7　Trace elements variation in the alteration zone in the Xincheng gold deposit

表 6　新城金矿蚀变岩微量元素含量表

Table 6　Trace element contents of rocks in the alteration zone of the Xincheng gold deposit

元素 / 样品号	Au	Ag	As	Sb	Hg	Cu	Pb	Zn	W	Sn	Mo	Bi	Mn	Co	Ni
XC001	0.3	42	0.8	0.07	9	6.6	17	24	0.3	1.4	1.25	0.04	931	0.8	2.4
XC002	1.0	87	1.2	0.13	10	7.7	29	173	0.3	1.3	0.86	0.03	1822	1.0	3.5
XC003	132.2	1167	10.5	0.42	12	27.4	509	386	1.1	0.9	0.72	1.04	900	1.4	3.3
XC005	131.2	1313	18.9	1.16	18	35.2	435	586	2.4	1.3	0.98	0.58	1566	1.7	4.6
XC006	5.4	72	1.4	0.15	10	5.7	9	16	8.4	0.8	2.84	0.04	756	0.9	3.2
XC007	1.1	53	1.2	29.32	21	8.4	19	26	2.8	1.2	5.62	0.11	825	5.1	11.9
XC008	5.4	61	1.0	0.23	5	3.8	28	13	0.9	1.1	0.37	0.05	325	1.2	2.7
XC009	23.5	212	2.2	0.64	13	18.8	70	16	4.4	1.5	1.90	0.19	608	2.6	4.8
XC017	4.7	362	1.0	0.10	16	40.5	28	52	0.2	1.0	0.40	0.10	368	1.3	3.0

注: 上表数据测试单位为中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所; Au、Ag 和 Hg 的含量单位为 ng/g; As、Sb、Cu、Pb、Zn、W、Mo、Bi、Co、Mn 和 Ni 的含量单位为 μg/g; 样品岩性见表 4。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

中与成矿作用相关的元素丰度明显增加。

A 阶段：含量升高的元素主要为 Sb、W、Mo、Mn、Co、Ni，其中升高量最大的为 Sb。含量降低的元素主要为 Au、Ag、As、Cu、Pb、Zn、Bi，其中降低量最大的为 Cu。

B 阶段：含量升高的元素主要为 Au、Ag、As、Cu、Pb、Zn、Bi，其中升高量最大的为 Au 和 Zn。含量降低的元素主要为 Sb、W、Mo、Mn、Co、Ni，其中降低量最大的为 Sb。

C 阶段：含量升高的元素主要为 Au、Pb、Bi、Mn，其中升高量最大的为 Bi。含量降低的元素为 As、Sb、W；其中降低量最大的主要为 Sb。

Au、Ag、Zn、As、Bi、Cu 和 Pb 在新城金矿构造蚀变岩带中一直处于迁入状态，说明形成蚀变岩带的成矿热液中富含上述成分，有利于金矿成矿。Au、Ag、Cu、Pb 和 Zn 等从未蚀变花岗岩带到弱钾化花岗岩带，有明显的含量下降趋势，而从弱钾化花岗岩带到绢英岩带一直呈现上升趋势，说明这些元素的富集时间与蚀变类型从钾化向绢云母化变化的时间是一致的。

5 结 论

新城金矿蚀变岩分带上述分析显示，蚀变带的构造与地球化学分带特征密切相关。

(1) 新城金矿蚀变岩分带特征：以焦家主断裂为中心，向下盘依次为断层泥－硅化带－绢英岩带－强钾化花岗岩带－弱钾化花岗岩带－未蚀变花岗岩带。金矿化主要集中在硅化带及绢英岩带中。

(2) 新城金矿构造岩分带特征：以焦家断裂主断裂面为中心，向下盘依次为糜棱岩带－碎裂岩带－花岗质碎裂岩带－碎裂花岗岩带。根据节理测量推断主压应力方向，从下盘蚀变中心向蚀变带边部向有东西方向－北西方向－北西方向－北北西方向的一系列变化。

构造蚀变带的差应力分布是 107.46 MPa、135.58 MPa、115.21 MPa、86.75 MPa，正常似斑状花岗岩仅为 71.56 MPa。这显示，控矿断裂既是构造应力强烈活动部位，也是热液的富集运移地带。

(3) 新城金矿成矿地球化学分析：①在常量化学成分中 Fe_2O_3、CaO、FeO、H_2O、CO_2 的迁移量较大且与 Au 元素变化趋势相似，这四种成分与 Au 元素相关性最强。它们以弱钾化花岗岩带到强钾化花岗岩带迁移量最高。②Au、Ag、Zn、As、Bi、Cu 和 Pb 在新城金矿构造蚀变岩带中一直处于迁入状态。Au、Ag、Cu、Pb 和 Zn 等从未蚀变花岗岩带到弱钾化花岗岩带，有明显的含量下降趋势，而从弱钾化花岗岩带到钾化和绢英岩带则一直呈现上升趋势，说明这元素富集成矿与钾化和绢云母化密切相关。

致谢：论文修改过程中，审稿者和吕古贤研究员提出了大量宝贵意见，在矿山工作中得到李俊英总工、李惠教授的指点，作者在此表示诚挚感谢。

参考文献(References)：

丁式江，翟裕生. 2000. 胶东焦家金矿田构造形迹的分形研究. 地球科学——中国地质大学学报，25(4)：416－421.

高帮飞，王庆飞，刘琰，徐浩. 2006. 中国南方红土型金成矿系列研究综述. 地质与勘探，42(3)：1－7.

李俊英. 2001. 焦家构造带控矿作用探讨——以莱州新城金矿床为例. 山东地质，17(2)：36－43.

李士先，刘长春，安郁宏，王为聪，黄太岭，杨承梅. 2007. 胶东金矿地质. 北京：地质出版社：211－218，294－297.

刘瑞珣. 1988. 显微构造地质学. 北京：北京大学出版社：131－188.

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：1－190.

吕古贤，林文蔚，罗元华，李晓波，倪师军，邓军，周绍东，曹志敏，张均. 1999. 构造物理化学与金矿成矿预测. 北京：地质出版社：305－311.

吕古贤，郭涛，舒斌，邓军，朱大岗，鲁安怀，殷秀兰，徐刚. 2001. 构造变形岩相形迹的大比例尺填图及其对隐伏矿床地质预测. 中国区域地质，20(3)：313－321.

吕古贤，郭涛，舒斌，申玉科，刘杜鹃，周国发，丁岳祥，武际春，赵可广，孙之夫，郑小礼，哈本海. 2007. 胶东金矿集中区构造体系多层次控矿规律研究. 大地构造与成矿学，31(2)：193－204.

钱建平，陈宏毅，吴小雷，王自国，蒙勇. 2011. 胶东望儿山金矿成矿构造分析和成矿预测. 大地构造与成矿学，35(2)：221－231.

宋明春，崔书学，伊丕厚，徐军祥，袁文花，姜洪利. 2010. 胶西北金矿集中区深部大型－超大型金矿找矿与成矿模式. 北京：地质出版社：1－3.

王华东，张建国，宗绪臻，刘多文. 1999. 新城金矿围岩蚀变与金矿化的关系. 黄金学报，1(4)：249－252.

吴淦国. 1998. 矿田构造与成矿预测. 地质力学学报，4(2)：1－4.

姚凤良，刘连登，孔庆存. 1990. 胶东西北部脉状金矿. 长春：吉林科学技术出版社：1－234.

姚凤良. 1991. 华北陆台北缘带金矿类型及成矿条件. 黄金科技动态，11：26－32.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

张存勇. 2002. 新城金矿控矿因素及深部成矿预测. 黄金，11(23)：6－9.

张可清，杨勇. 2002. 蚀变岩质量平衡计算方法介绍. 地质科技情报，21(3)：104－107.

赵海，赵可广，马耀丽，修春华. 2004. 胶东新城金矿地质构造特征及深部找矿方向. 地质力学学报，10(2)：129－136.

Goetze C and Kohlstedt D L. 1977. The dislocation structure of experimentally deformed marble. *Contrib Mineral Petrol*，59(3)：293－306.

Twiss R J. 1977. Theory and applicability of a recrystallized grain size paleopiezometer. *Pure Appl Geophys*，115：227－244.

Structural and Geochemical Characteristics of Alteration Zone of Xincheng Gold Deposit

LV Chengxun[1]，WU Ganguo[1]，CHEN Xiaolong[2]，ZHANG Yingchun[1]，ZHANG Xunyu[1] and ZHAO Hai[3]

(1. *School of Earth Sciences and Resources，China University of Geosciences (Beijing)，Beijing* 100083，*China*；2. 247 *Geological Party，Hunan Bureau of Nonferrous Geological Exploration，Changsha* 410129，*Hunan，China*；3. *Xincheng Gold Mine of Shandong Gold Group，Laizhou* 261438，*Shandong，China*)

Abstract: By measuring section about structure and altered rocks in the Xincheng gold deposit，combining structural observation and geochemical analysis，the authors obtained that structure and geochemistry have synchronous variation characteristics：(1) altered rock zonation along the Jiaojia fault is fault gouge-silicified zone-beresitization zone-highly potassic granite-weakly potassic granite-unaltered granite；(2) gold mineralization mainly exists in the silicified zone and beresitization zone；(3) fault gouge-mylonite-fractured altered granitic rock-fractured granites successively developped in the down block of fault；(4) structural observation shows the orientation of principal compressive stress of alteration zones in the down block of fault changes by WE-NW-NW-NNW directions successively，while the stress values of the rocks are 107.46 MPa，135.58 MPa，115.21 MPa，86.75 MPa，and 71.56 MPa of normal granites；(5) major element analysis for rocks of alteration zone reveals，the migration of Fe_2O_3，CaO，FeO，H_2O，CO_2 is large，showing synchronous change of Au with the maximizes in the transition from highly potassic granite to weakly potassic granite；trace elements like Au，Ag，Zn，As，Bi，Cu and Pb keeps immigrating during alteration，and maximizes in the zone of potash feldspathization and sericitization.

Field structural observation，petrology study and rock chemical analysis show clearly that hydrothermal alteration mineralization is closely associated with the distribution of tectonic stress field，which reveals the enrichment of minerogenetic elements has certain relationship with structure intensity，that is to say，during the process of NW compression and tectonic stress in the highest stage，elements enriched and mineralized.

Keywords: Xincheng gold deposit；alteration zonation；tectonic rock zonation；stress zonation；geochemical zone

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net