金矿成矿过程中构造应力场转变与热液浓缩-稀释作用

吕古贤[1],林文蔚[2],郭 涛[1],殷秀兰[1],
舒 斌[1],郭初笋[1]

(1. 中国地质科学院 地质力学研究所,北京 100081;2. 中国地质科学院 矿床资源研究所,北京 100037)

摘 要 在大量野外地质观测和室内测试分析研究基础上,进一步证实热液金矿工业矿化富集大多数是在构造应力较为张弛的环境下形成的。构造变形岩相形迹的大比例尺填图及测量分析表明,热液金矿成矿早期的热液蚀变矿化作用是在压剪性构造背景之下进行的,而主要工业矿化与张剪破裂即引张构造有着密切的联系,两个阶段的构造应力场有近乎于正交的转化。岩石矿物及流体地球化学的系统分析发现,几乎所有的大中型热液矿床中都在热液蚀变基础上伴随强烈的成矿流体浓缩作用,初始浓度较稀薄的含矿流体,通过水岩反应生成富水矿物的交代带,使热液中的自由水大规模缩减,并且,其自由水通过与 C、S 等组分的反应也被大量地消耗,流体的减压沸腾也极大促进成矿热液中自由水的减少,从而使残余流体中金属浓度增高,水岩系统中流体的浓缩即时与构造应力场转化为引张作用耦合,引起新的流体加入,随后的稀释作用形成金属硫化物的沉淀。

关键词 热液金矿;构造应力场转化;流体浓缩-稀释;胶东玲珑-焦家式金矿
中图分类号 P611;P553 **文献标识码** A **文章编号** 1005-2321(2001)04-0253-12

对于构造应力场与矿化作用之间的关系,长期以来人们多注意压性、压剪性构造体制的成矿作用,认为成矿作用与大规模剪切带的挤压应力、应变作用有关[1,2],然而大量的野外证据和实验研究表明[3,4],工业矿化富集主要是在一种应力较为松弛的环境下进行,矿化作用和张剪性破裂有着密切的关系,这就为研究构造应力场的成矿提出了新的问题,即热液矿床成矿过程中构造应力场转变问题。构造应力场的转变包括主应力方位的变化及差异应力值大小的变化。

矿床地质学家和地球化学家注意到这个问题之后对它开展了研究。赵伦山、吴悦斌等(1993)从水致爆裂成矿思路出发做了大量实际工作。然而,矿带矿床明显的大量线性展布说明要从更宽广的方面加以探讨。

过去人们只研究不同地壳构造层次的构造叠加作用,以及岩石随温度、压力等条件的变化而由韧性向脆性变形之间的转换,而对同一构造层次不同时期、不同构造部位岩石的应变、应力特征涉及较少。其实在成矿作用过程中,这种同一构造层次在不同时期或处于不同构造部位的岩石变形特征的转化似乎对成矿影响更大[5]。由于不同时期、不同构造部位构造应力参数及岩石渗透率[6]的变化,导致含矿热液物理化学场结构的差异,形成不同的构造物理化学参量急变的界面,从而发生含金矿化热液的蚀变与矿化作用[7]。

关于水岩反应中成矿流体的浓缩作用,中外文献很少报道。笔者[8]认为成矿流体在水-岩反应中的浓缩作用是成矿流体达到饱和的主要途径,在成矿流体达到饱和的情况下,再次构造脉动和新的低浓度流体的涌入,造成饱和流体的稀释,导致流体中 Cl^-、H_2S 浓度的降低是金属矿化得以形成的主要原因。

本文以胶东玲珑-焦家式金矿矿床地质及地球化学研究为基础[9,10],提出成矿过程中构造应力场

收稿日期:2000-11-09;修订日期:2001-07-24
基金项目:国家攀登计划(1999043214);国家计委科技找矿项目(JG947110);国家攀登项目(95-预-39);国家科委基础研究特别支持项目(KJ94-83);国土资源部基础项目(992027)
作者简介:吕古贤(1949—),男,博士,研究员,博士生导师,区测找矿专业,主要从事地质力学、矿田构造研究,近年主要深入于构造物理化学的理论与应用研究工作。

近于正交的转化和热液流体浓缩作用的内外耦合响应，是热液金属矿床工业矿化形成的基本特征。

1 胶东玲珑-焦家式金矿构造控矿与热液蚀变矿化特征

胶东金矿主要工业储量产在石英脉型（玲珑式）和碎裂蚀变岩型（焦家式）金矿床中。这两种矿化形式是具同一成矿物质来源、在同一成矿地质背景主要由局部不同构造环境造成不同成矿物理化学条件而产生的，是同一矿床类型中的矿化亚类别，被统称之为“玲珑-焦家式”金矿——胶东变质岩区内中生代交代重熔花岗岩岩浆期后剪切带型石英脉-黄铁绢英质碎裂蚀变岩型热液金矿床[9]。

该类矿床有相同的热液蚀变类型[11,12]，热液交代过程分为两个成矿期、5～6个成矿阶段。两个成矿期为流体-水-岩交代作用期和热液作用成矿期。热液作用成矿期包括（1）金-粗粒黄铁矿-石英阶段；（2）金-细粒黄铁矿-黄铜矿-石英阶段；（3）金-银-多金属硫化物-石英阶段；（4）碳酸盐-石英阶段。

一般说来[13]，压扭性韧性剪切带内碎裂蚀变岩型金矿以细脉浸染状交代蚀变矿石为主，第1、2成矿阶段表现更明显一些；而张扭性脆性变形空间中交代充填石英脉矿石更发育一些，第3、4成矿阶段为主。各种矿石构造表明（图1），工业矿化富集主要是在一种应力较低，偏于构造松弛的剪张环境中发生的。这种地质构造特征可以从应力场的转化与热液浓缩-稀释作用来加以认识。

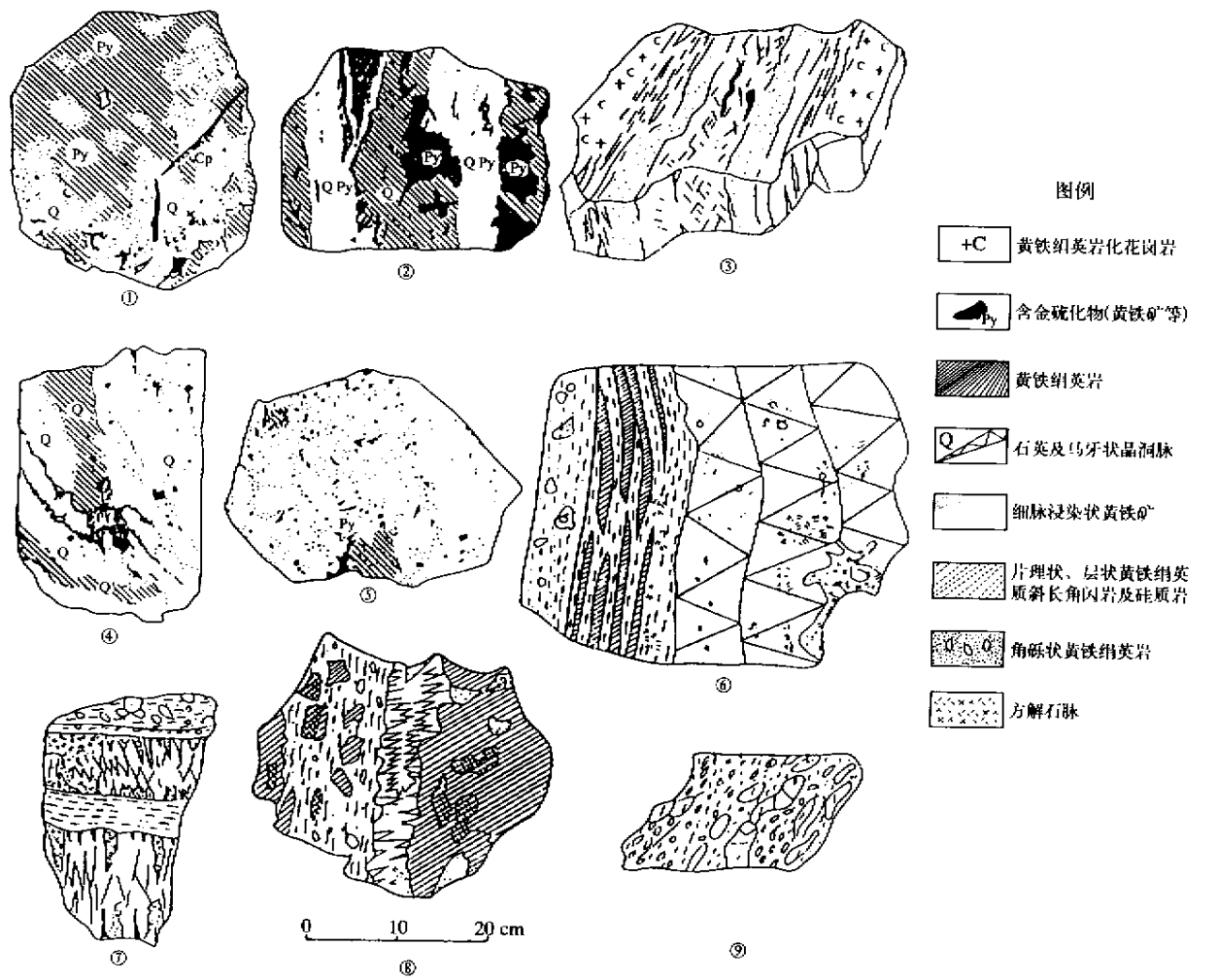


图1 胶东金矿典型矿石构造素描图

Fig.1 Sketch map of typical ore structure in Jiaodong gold deposits

①黄铁绢英脉金矿石（据张韫璞等，1988）；②黄铁矿石英脉矿石（据张韫璞等，1988）；③绢英岩化花岗岩-细脉浸染状黄铁矿石，石英脉与含硫化物方解石脉组成岩石；④网脉状含金石英脉钻孔岩芯；⑤细脉浸染状黄铁绢英岩矿石；⑥块状-细脉状含金石英脉-角砾状含金黄铁绢英质蚀变岩；⑦层状黄铁绢英岩中发育的含金石英晶洞脉；⑧黄铁绢英岩呈角砾状产于层状蚀变岩中，后期含金黄铁矿石英晶洞发育；⑨含金黄铁绢英岩及石英脉，受构造作用影响呈角砾状结构、构造

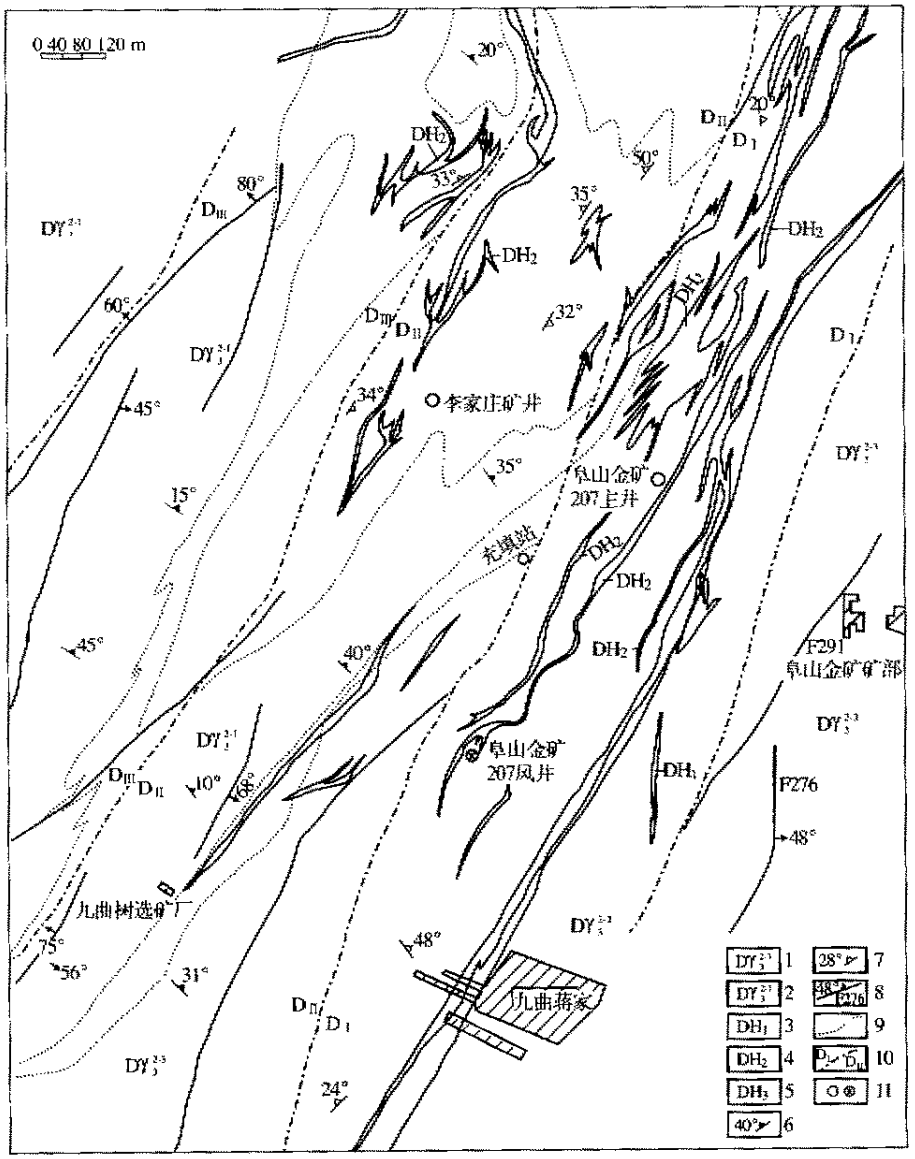


图 2　阜山金矿区构造变形岩相形迹图

Fig.2　Geological map of tectono-deformation-facies features in Fushan gold deposit

1—滦家河二长花岗岩；2—玲珑黑云母花岗岩；3—强变形蚀变岩；4—变形蚀变岩；5—弱变形蚀变岩；6—片麻理产状；7—叶理产状；8—断裂及产状；9—岩性界线；10—岩相界线；11—主井和风井

2　交代蚀变矿化过程构造应力场的转化

焦家金矿田的几个典型矿床及黄埠岭金矿的蚀变成矿构造研究，热液交代蚀变和矿化期构造应力场研究与对比，均表明在交代蚀变矿化的过程中构造应力场发生了最大压应力方向近于正交的转变和应力值由强到弱的转化。

热液金矿床的蚀变分带是伴随成岩成矿过程的产物，一般矿床蚀变岩研究多侧重于室内对岩石、矿物及其地球化学变化的研究。而我们不仅把蚀变岩作为研究组成成分的标志，而且把它们作为同热液作用期的构造和应力的野外踪迹，称之为“构造变形岩相形迹”[9,10]。

我们把反映该类矿床成矿过程的岩石组合称之为矿源岩系[9,10]，将矿源岩系的变形岩相形迹作为大比例尺填图图例，完成了玲珑矿田阜山金矿区 1∶2 000 地质填图（图 2）。通过这一研究可以把成岩期与成矿期，及成矿期不同成矿阶段的构造岩石单元在实地上区分开。该图明显表明，花岗岩成岩期主压剪构造面呈 NWW 向均匀延展，而蚀变成矿

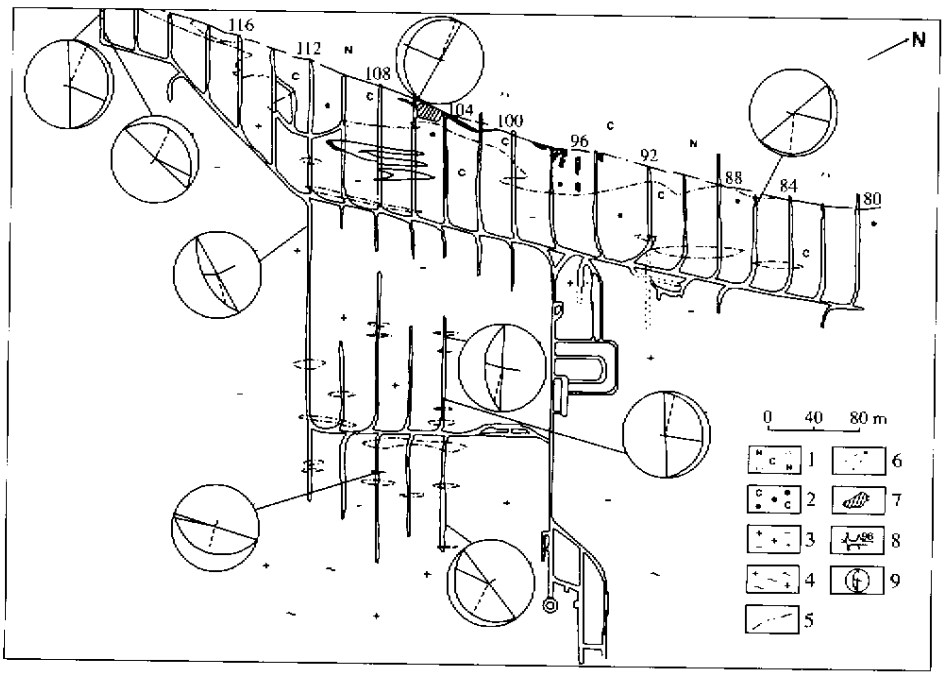


图 3 焦家金矿 -190 m 中段节理统计结果及构造应力场分析图

Fig.3 The map of statistical study of joint relating to stress field, -190 m in Jiaojia gold deposit

1—绢英岩化斜长角闪岩；2—黄铁绢英岩；3—红化花岗岩；4—黑云母片麻岩；5—焦家断裂；6—矿体；7—采空区；8—勘探线及穿脉；9—应力图解

带呈 NNE 走向不均匀分布。

2.1 蚀变交代作用早期的构造变形岩相形迹特征

焦家金矿位于 NE 走向的焦家断裂及其下盘次级分支断裂带内。含矿岩块上盘与胶东变质岩呈断层接触。矿脉围岩是黄铁绢英岩化的似片麻状花岗岩。

在焦家金矿 -190 m 中段进行了 1∶1 000 构造变形岩相形迹填图①。用这样的详细实测资料，较合理地把不同成岩阶段、不同蚀变矿化阶段保留下来的构造岩石单元区分开来，为研究其构造动力学环境奠定了地质基础。通过大比例尺构造变形岩相形迹填图与研究（图 3），发现：(1)花岗岩成矿期的构造与胶东基底构造协调，其构造总体表现为 NWW-SEE 或近 EW 向似片麻理，反映区域主压应力方向是 SN-NNE 方向。(2)水岩交代作用期的构造与中生代新华夏系一致，表现为 NE、NNE 或近于 SN 方向展布的蚀变交代叶理、细纹理。说明该时期的构造应力场最大主压应力方向有 EW 向，NWW-NW 方向，且以 NW 方向占明显主导作用。这一期构造不仅控制了交代岩石的分布，也控制着矿化岩带的展布延伸。

2.2 含金硫化物沉淀成矿阶段的构造特征

对焦家金矿区开采中段的矿化节理裂隙的系统统计分析表明（图 4），近 EW 向的占 26.2%，近 SN 向的占 13.1%，NE 向的占 47.8%，NW 向的占 13.1%，其中 NE 向占绝对优势。再从磁组构结果来看，近 EW 向的占 14.3%，近 NNW-SN 向的占 33.2%，NE 向的占 25%，其中 NNW 方向起着主导作用。导致这种现象产生的原因，除了采用方法及测量、分析误差外，可能它们分别代表了成矿期不同矿化阶段的应力变化。也就是说在工业矿石沉淀阶段，构造应力场主压应力方位有一个逐渐偏转的过程，由早期的近 NW-SE 向挤压逐渐变为 NE 向挤压，反映出早期断裂活动以逆冲为主，晚期则有回落下滑。

望儿山金矿处于焦家金矿区的东部，发育在焦家断裂下盘，以节理、裂隙测量分析为手段[14]对它的成矿期构造应力场进行了研究。为了更准确地区分成矿阶段，主要选择能反映主压应力方向的张裂性质明显的裂隙、节理进行统计测量。根据成矿期含脉节理形成的先后顺序，在矿山 0 m，-20 m，-60 m，-90 m 和 -120 m 中段的 23 线、25 线 27 线的剪切带内部分别测量并统计了成矿早期阶段石英钾长石脉、成矿主要阶段石英黄铁矿脉和多金属硫

① 参加野外地质填图的还有邓军、丁益民、朱大岗、张成江、鲁安怀、修淑芝和徐刚等。

化物脉、成矿晚阶段碳酸盐石英细脉，共计 1 521 条。这些脉（图 3）总体走向界于 NW350° ~ NE35°，平均为 NE15°。不同走向的节理中充填不同的蚀变及矿化矿物脉体，充填石英钾长石脉的节理面粗糙不平，具延伸小、尖灭快的张扭性节理特征，节理走向

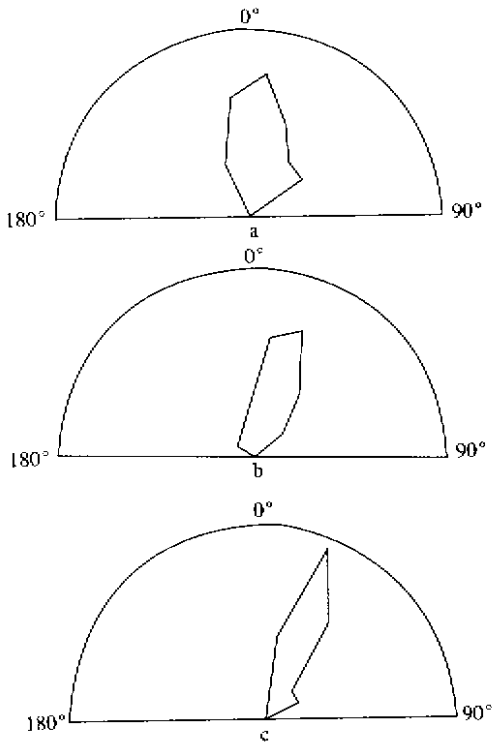


图 4　焦家金矿田望儿山金矿裂隙走向玫瑰花图
（据方金云，1996）

Fig.4　Joint rose diagram of Wangershan gold deposit in Jiaojia gold orefield

a—含水硅酸盐阶段；b—石英黄铁矿阶段；c—碳酸盐阶段

NW350° ~ NE15°，优选走向 NE5°；充填多金属硫化物脉和石英黄铁矿脉的节理走向 NE5° ~ NE25°，优选走向 NE15°；充填碳酸岩脉的节理走向 NE10° ~ NE35°，平均为 NE25°。

根据胶东玲珑-焦家式热液金矿的蚀变矿化特点[15]，即从石英钾长石化阶段、硫化物石英脉阶段到碳酸盐岩阶段的演化特点，结合剪切带和区域断裂的几何学、运动学关系可以厘定构造应力场中主应力方位的变化。也就是说，成矿期主压应力方向为 NEE-SWW，且随着成矿阶段从早到晚演化，主压应力方向从 NE5°向 NE25°偏移，与蚀变交代期以 NW-SE 向为主压应力方向的应力场近于正交。

可以发现成矿期间，早期构造在较强挤压状态下形成交代蚀变带，在其内部局部地段产生应变能和渗流势的集中区。由于构造应力场的转变，应变能不断积累不仅引起岩石破裂或先存断裂的再活动，而且打破成矿元素物理化学平衡状态使成矿元素与热液一起，在渗流势的作用下沿岩石的孔隙或裂隙从渗流势高值区向低值区运移，并在适宜的、物化条件有利的构造部位（扩容区）重新聚集形成矿体。成矿期构造应力场的转变制约着应变能和渗流势的分布状态，不仅控制断裂及其分支剪切带的复杂而有序的内部结构，而且也控制着流体物理化学条件的变化及多期次的成矿作用，以致形成了焦家金矿区这一大型矿床特有的矿体赋存规律。

2.3　构造应力场转化的数值模拟

在构造变形蚀变岩的填图基础上，结合上述大量的测量工作并在室内通过磁组构、X 光岩组、古差应力测算等工作，恢复构造应力的方向及大小，用计算机模拟细脉浸染状黄铁绢英质蚀变矿化阶段和石英脉工业矿化阶段的构造强烈挤压转而应力松弛、应力值降低、主压应力方向转化的特征（图 5）。这些实验可以表明，焦家矿区成矿早期、蚀变交代岩形成期最大主应力为 NW-SE 向，而成矿的工业矿化阶段，最大主压应力为 NNE-SN 向，局部为 NNW 向。这一结果反映了该区蚀变与矿化的构造特征，说明这期间构造应力场有一明显的近于正交的转变。阜山金矿构造应力场的最大主压应力方向由 NWW-SEE 变化为 SN-NNW 方向，也反映了这种构造应力场的转化。

3　成矿流体的浓缩作用及浓缩方式研究

热液金矿是构造力控制下水岩交代作用的产物。配合研究矿区的构造应力场在热液蚀变-成矿期间的巨大变化，发现在成矿热液的蚀变交代过程中曾发生过巨量多次流体的浓缩-稀释作用与挤压-引张交替过程的相互耦合。这一耦合作用是含金硫化物沉淀成矿的主要内外动力学原因。

胶东玲珑-焦家式金矿[9]是典型的岩浆期后剪切带型热液金矿[16~19]，在构造控矿、成矿的过程中，胶东地区几乎所有的大中型热液矿床中都广泛存在着热液蚀变现象[11,20~22]，且伴随着强烈的成矿流体浓缩作用。构造应力场的转化与流体浓缩-稀释的内外耦合是形成热液金矿主要的成矿作用。初始金属浓度较稀薄的流体通过水岩反应生成富水矿物的

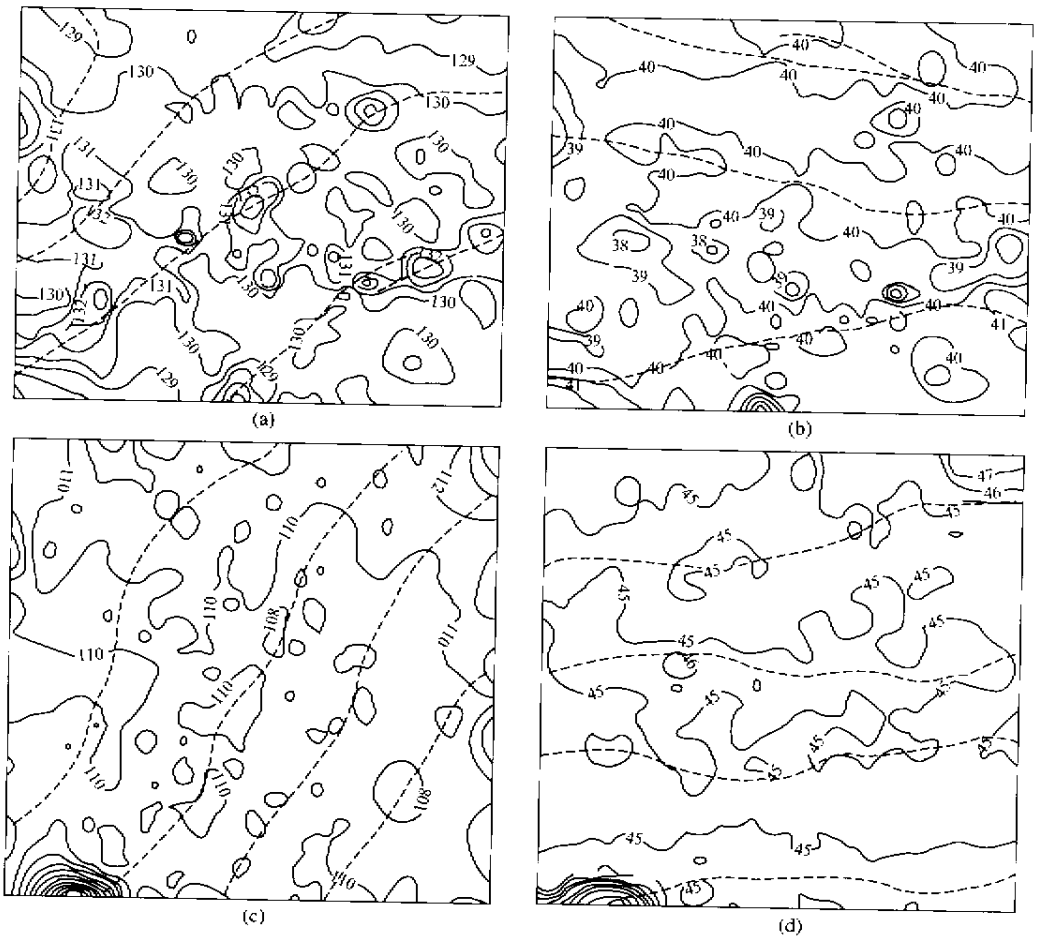


图 5 构造应力场特征图

Fig.5 Distribution plan of stress field

焦家金矿区(a,b)和阜山金矿(c,d)；蚀变矿化阶段(a,c)和工业矿化阶段(b,d))。图中实线为最大主压应力等值线，单位：MPa；虚线为区域最大主压应力作用面轨迹。a,b 时代为 110 Ma→105 Ma；c,d 时代为 80～100 Ma→70 Ma(据吕古贤等，1993)

交代带并使热液中的自由水固化在蚀变岩石中，热液中的自由水与 C、S 等组分反应而被大量地消耗，流体的减压沸腾可极大地促进成矿热液中自由水的减少，这些物理和化学过程使残余流体中金属浓度增高。可以通过构造变形蚀变岩填图、实验模拟、特征指示性元素性状研究和交代剖面的数学模拟获得成矿溶液浓缩的幅度，进而判定矿化规模研究金矿形成过程中的构造动力学体制转化与流体浓缩-稀释的耦合机制。通常在大、中型 矿床中都发生过多次流体浓缩作用，依据水岩反应中流体浓缩理论建立了含矿交代建造的识别准则。

3.1 水-岩反应中成矿流体浓缩作用的基本概念

所谓成矿流体的浓缩作用是指含矿流体在其运移、循环过程中，由于物理化学条件的变化和水-岩反应造成自由水的逸失，体系中水量减少、致使剩余流体浓缩的地质作用。这一作用的直接结果是使残余(剩余)流体中金属浓度增高，促使金属络合物达到饱和。由于大规模的含水硅酸盐的生成及其它形式水量的减少，这种浓缩可达 10 倍以上，在个别情况下可达 100 倍。С. Р. Крайнов 和 Б. Н. Рыненко (1997)通过实验研究和热力学模拟[23]指出："当花岗岩-水体系的模拟达到平衡状态时，体系中水相的数量减少在 3 个数量级以上。"由此可见，在内生成矿过程中水的浓缩作用是导致矿液饱和的重要因素之一。

3.2 天然成矿流体系统浓缩的主要方式

3.2.1 水-岩反应中热液蚀变带的形成与水的浓缩

各类与热液活动有关的矿床都伴随广泛而强烈的蚀变作用，大、中型金属矿床往往有多期次多阶段的成矿作用，喻示出成矿构造的多次开合和含矿流体的多次涌入，与之伴随的是发生多次的水-岩反应和成矿流体的浓缩作用[24,25]。

各种围岩蚀变类型都有大量含水矿物的形成，如在酸性淋滤阶段广泛发育有白云母(4.54%，指含水矿物中水的质量分数，后同)、绢云母(6.19%)、水白云母(6.37%)、铁锂云母(1.0%)、锂云母(1.0%)、黄玉(0.82% ~ 1.44%)、绿帘石(1.88%)、黝帘石(2.24%)、绿泥石(11.16%)、伊利石(7.12%)，在次生石英岩和泥化岩的交代建造中有叶蜡石(5.23%)、迪开石(13.91% ~ 14.10%)、蒙脱石(7.12%)、高岭石(14.23%)、多水高岭石(19.79%)、沸石(9.5% ~ 21.3%)等富水矿物，并且蚀变带的范围远远超过矿体的范围。这足以说明在成矿作用中大量的水通过水-岩反应“固化”在蚀变岩中，促成了含矿流体的浓缩。如胶东三山岛金矿区围绕主矿体形成黄铁绢英岩的交代建造(图 6)，由矿体下盘至矿体上盘形成钾化花岗岩—绢云母化花岗岩-黄铁绢英岩—矿体—黄铁绢英岩—绢云母化花岗岩—钾化花岗岩的交代剖面。

依据图 6 可以计算出各交代带中按长 1 cm，高 1 cm 交代柱中岩石中含水量为 1 455.2 g，蚀变花岗岩的原岩中可提供的水量为 192.07 g，据此计算出由热液补给的水量为 1 263.1 g。该矿脉金属矿化弥散宽度为 21.8 m(表 1)，工业矿体仅 2 ~ 4 m，据野外观察估算构造带内含水空隙占总体积的 20% ~ 25%，因此构造带的充水量仅为 456 g 左右(均按单位高度、长度为 1 cm 计算)。也就是说构造带内的储水量远低于形成蚀变带所需的水量，这就需要构造带的多次开合，伴有成矿溶液的多次浓缩和新的流体的补给，促成了溶液物理化学状态的改变和矿质的沉积。按上述资料计算，三山岛的成岩成矿作用至少经三次以上的构造开合，并形成交代带的扩展和叠加。

表 1 三山岛矿区各交代带岩石中的水量

Table 1 Water capacity of rock in different altered belts, Sanshandao gold deposit

岩石名称	岩石体重 /(g·cm^{-3})	岩石含水量 /%	带宽 /m	各带岩石中水量* /g
黑云母花岗岩	2.70	0.30		
钾化花岗岩	2.68	2.22	51.4	305.81
绢英岩化花岗岩	2.70	1.32	42.86	152.75
黄铁绢英岩	2.94	2.82	62.86	521.16
矿体			22.80	
黄铁绢英岩	2.94	2.82	11.43	94.76
绢英岩化花岗岩	2.70	1.32	11.43	40.74
钾化花岗岩	2.68	2.22	57.14	339.96

* 以各带的实际宽度计算，交代柱的长度、高度均按单位长度(1 cm)计算。蚀变带总水量为 1 452.2 g。

3.2.2 成矿流体中 C、S 等组分的加入能大幅度促进水的浓缩作用

近年来矿床学研究中，特别是金矿床研究中，碳质的作用(包括有机质)愈来愈多的引起人们的注目。在微细粒浸染型金矿中总碳含量可高达 15% 以上，近年来的研究表明碳质和有机质对金成矿的作用主要表现为(1) 碳质对金的吸附作用；(2) 形成金属的有机质化合物。除上述作用外，我们认为最具有普遍意义的是碳与水反应能大幅度地促使成矿流体的浓缩。除卡林型金矿具有显著的高碳含量外，含 CO_2、CH_4 等的包体在各类矿床中几乎均可见及，而尤其发育于金矿床中。对胶东、小秦岭、福建紫金山等矿区中石英流体包裹体的气相组成研究得出以下认识：(1) 胶东、小秦岭大型、特大型金矿床中普遍富含 CO_2 包体，镜下广泛见到液相 CO_2 包体，在盐水溶液中 CO_2 的溶解度很高，如阜山金矿的盐水溶液中 CO_2 摩尔分数竟高达 38.6% ~ 62.2%；(2) 高浓度的 CO_2 包裹体主要出现在绢云岩化和黄铁绢英岩化的蚀变带中；(3) 与岩浆作用、重熔岩浆作用有关的金矿床富含 CO_2 包体，而有天水参与的低温浅成矿床 CO_2 含量较少。

由阜山金矿流体包体激光拉曼探针测定结果可以看出，在包体的气相组成中 $CO_2 + CH_4$ 占气相的 71% ~ 100%(摩尔分数)，在含液相 CO_2 的包裹体中则完全由 CO_2、CH_4、SO_2 构成，未测出水，在盐水溶液中，含碳化合物的数量也高达 22% ~ 70%，平均为 45.78%，并且随温度、压力的增高 CO_2、CH_4 的摩尔分数在总体上有增高趋势。由此可见，阜山金矿早期成矿阶段($t \geqslant 290$ ℃，$p \geqslant 100$ MPa)热液及嗣后的低温矿化水溶液中均含有大量碳-氧、碳-氢化合物。

碳质的加入能极大地改变成矿溶液的性质，影响体系的内压、pH 值、Eh 值以及含金络合物的稳定性，除此以外，最为重要的是通过碳-水反应改变体系中的水/岩比，如下述反应(仅表示其质量平衡)：$2C + 2H_2O = CH_4 + CO_2$；$3C + 2H_2O = CH_4 + 2CO$；$CH_4 + H_2O = CO + 3H_2$。

由上述反应可见由于碳-水反应促使了水的分解，形成碳质化合物，促使流体体系中自由水减少，气态组分增加，体系内压增高，同时含 CO_2 的弱酸性溶液有利于对围岩产生广泛淋滤，使围岩中的金活化迁移。由上述反应式可以看出大约 1 mol 的碳可使 1 mol 的水分解，如三山岛蚀变剖面蚀变带宽以

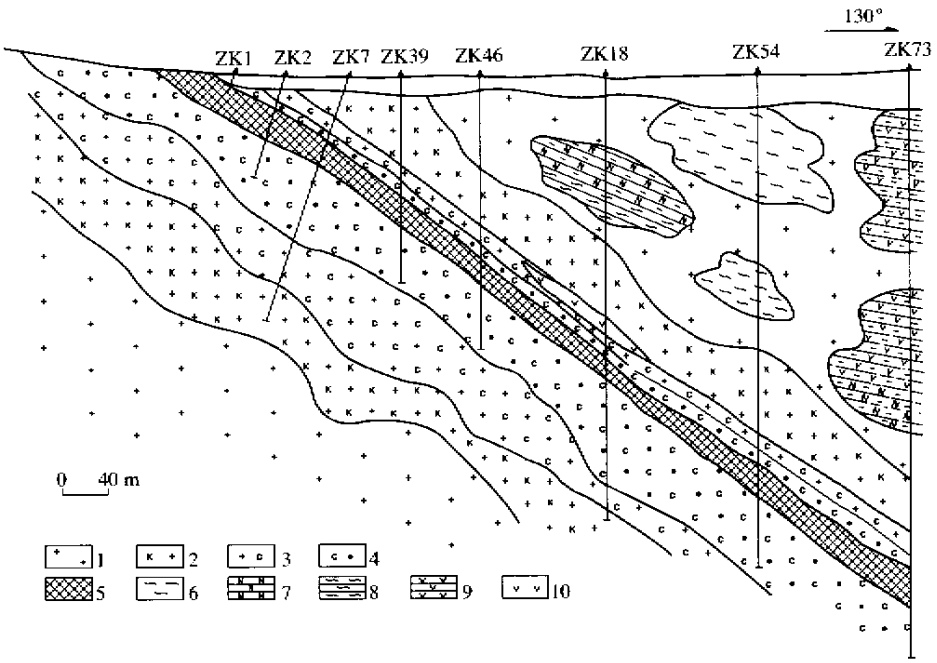


图 6 三山岛金矿床 40 线围岩蚀变分带剖面图
(据赵国红，1992)

Fig.6 The profile of wall-rock alteration zone, line 40 in Sanshandao gold deposit
1 – 黑云母花岗岩；2 – 钾化花岗岩；3 – 绢云母化花岗岩；4 – 黄铁绢英岩；5 – 矿体；6 – 混合岩；
7 – 混合岩化斜长黑云片岩；8 – 黑云母片岩；9 – 斜长角闪岩；10 – 煌斑岩

237 m 计，假若原岩中含碳仅为 0.5%，这些碳通过水-岩反应转化成 CO_2 或碳氢化合物需要 427 g 水(交代剖面按单位高、长为 1 cm 计算)，这一数量与构造带中一次储水量(456 g)相近，约等于形成蚀变带水量的 1/3，这说明碳质的烃化作用能极大地消耗自由水，使体系中的水浓缩，从而使其中溶解的金属物质趋于饱和。

地层中硫的捕获，在高温状态下与水反应形成硫氢化合物也能使体系中的水发生浓缩，并可能使含矿流体向酸性演化。

3.2.3 沸腾、酸碱分异及流体相的浓缩

含矿溶液在局部地热场的驱动下向浅部上升，静水压力不断降低，并最终降至流体在该种状态下的饱和蒸汽压。此时如果发生构造破裂，压力将骤然降低，并导致流体沿构造带迅速上升和成矿流体的沸腾，造成 CO_2、H_2S、SO_2 等酸性组分大量逸出，同时引起水的广泛气化，致使残余流体相盐度增高，pH 值增大。流体冷却，金属络合物饱和程度增强。体系内压的减小会导致新的流体的补给，促使混合-冷却机制发生作用，致使金属硫络合物解体，如在 $Me(HS)_3 \rightarrow MeS + HS^- + H_2S(aq)$ 反应中，任何降低 $a(HS^-)$、$a(H_2S,aq)$ 值的作用，不是导致这种络合物趋于饱和，就是促使其发生沉淀。对于许多金属来说，温度、压力的降低，特别是流体沸腾均可引起金属硫化物发生沉淀。上反应式中新流体(天水或深源水)的涌入将促成 $a(HS^-)$、$a(H_2S,aq)$ 值的减小，导致含硫络合物解体和金属硫化物形成。氧逸度增高和酸性环境均能促使反应向右进行，这是因为 $H_2S + 2O_2 \rightarrow H^+ + HSO_4^-$，$HS^- + H^+ \rightarrow H_2S(aq)$，$H_2S(aq) \rightarrow H_2S(g)\uparrow$，即 H_2S 逸出。上述反应揭示出酸性氧化条件不仅导致硫化物的沉积而且也能产生硫酸盐矿物，如 Pb、Zn 矿床往往与酸性较低温的交代建造有关，并且常伴有低温硫酸盐矿物的形成，分凝出富含 H_2S、CO_2 的酸性组分和水，可能发生下述酸化反应：

$$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + FeS_2 + 2H_2O + 3O_2 = KAl_3(SO_4)_2(OH)_6 + 3SiO_2 + Fe^{3+},$$

$$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 2H_2S + 4O_2 = KAl_3(SO_4)_2(OH)_6 + 3SiO_2。$$

由上式可见，在相对封闭的充水裂隙系统中、在形成交代带过程中，自由水大量减少，新的流体加入，造成成矿早期阶段以内生水为主，晚期向天水方向演化，并在后续的稀释作用中形成金属硫化物的淀积。

3.3 成矿流体浓缩的主要研究方法及数学模拟

水-岩交代反应过程中水的浓缩作用大抵可借

助于下列方法予以研究：

（1）通过各交代带中的岩石化学组成、水的含量、岩石体重及蚀变带的规模等资料可以计算出在各交代带形成过程中所需水量（下限值），如三山岛矿区主矿脉蚀变带的宽度为 237 m（蚀变带的真实宽度远大于此值），按蚀变带长 2 000 m、深 1 500 m 计，可算出蚀变带形成过程中水的需要量的下限值为 43.656 Mt。

（2）实验模拟，即通过实验的方法来模拟水岩反应中水的浓缩作用。C.P.Крайнов[23]等用实验的方法解释了花岗质岩石的分布特征，在花岗岩中 F、Cl 含量在克拉克量级的背景上，通过水的浓缩作用也可以形成高盐度的地下水。

（3）用特征的指示元素来指示水-岩反应中水的浓缩程度。

（4）建立水-岩反应的地质模型，以数学-物理化学模拟的方法生成交代剖面，一方面研究 H_2O、CO_2逸度的变化对交代建造形成的影响，另一方面计算出在交代带形成过程中水消耗的数量。

本次研究对三山岛、玲珑矿田阜山金矿区 207 号脉的围岩蚀变剖面进行了模拟计算。其思路是以蚀变岩石的原岩与 H_2O 相互作用，不断改变 H_2O（及 CO_2）的约束条件，使其一步步生成蚀变带中各交代相的矿物组合，且满足在给定条件下体系自由能值最小，即：

$$\mathrm{Min} = G = \sum_i^n \mu_i x_i \qquad (1)$$

μ_i 为指定温度压力条件下，体系中第 i 种组分的化学势 x_i 为各化合物（矿物）摩尔分数，且应满足：

$$x_i \geqslant 0 (i = 1, \cdots, n)$$

$$\sum a_{ie} x_i \leqslant B_e \qquad (2)$$

B_e 是体系中第 e 种组分的总量（由化学分析值得出，如 SiO_2、Al_2O_3…）；a_{ie} 为第 e 种元素（氧化物）在矿物中的含量。

为了更好地探索 H_2O 在交代作用中的地位，我们把它作为有限的开放系统，对于 H_2O，把（2）式改为

$$\sum a_i(H_2O) \cdot x_i \geqslant B(H_2O) \qquad (3)$$

在给定的一系列 $B(H_2O)$ 的基础上（如 0.3%，0.5%…）采用（3）式，引入人工基底求解线性规则。

本次计算采用的温度统一为 600 K，$p = 1.013\ 25 \times 10^5$ Pa，上述 3 个矿区用于计算的原始资料来自各矿区岩石和矿物的化学分析值。

交代剖面的模拟结果见图 7。由图 7 可以看出随 H_2O 逸度的增高碱性长石变得不稳定，其中钾长石较钠长石首先消失，被淋滤出的 K、Al、Si 等组分借助于斜长石晶体的表面缺陷（由斜长石被水部分淋滤形成的）转生出绢云母，这可能是绢云母大量在斜长石表面附生的原因，随交代作用的进行钠长石也相继消失，当溶液中钾的含量不足时，促成了在绢云母-水白云母中钠对钾的取代，致使绢云母中钠的含量增高，这种相对富钠的绢云母是酸性淋滤作用继续发展的结果。

由模拟结果可以看出下述规律：

（1）这 3 个矿区表现出酸性淋滤交代建造的共同特征，即随体系中水逸度的增高形成一套富水矿物组合，随交代作用的进行，蚀变剖面中矿物种数减少，石英含量增多，最终是向着石英两矿物带和石英

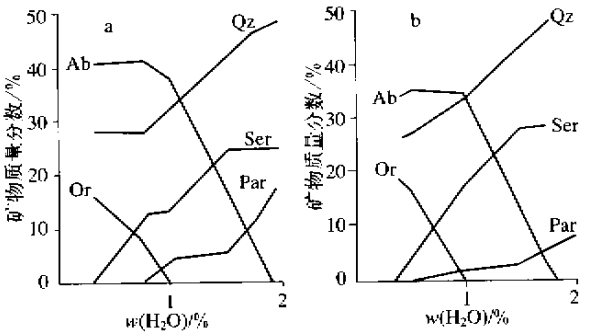


图 7 交代相的数学模拟结果

Fig.7 Numerical simulation of altered belts

a—三山岛矿区交代相的数学模拟结果；

b—玲珑矿田 207 号脉交代相的数学模拟结果。

图中矿物代号：Qz－石英；Ab－钠长石；Or－钾长石；Ser－绢云母（钾质）；Par－绢云母-水白云母中的钠云母组合

单矿物带方向演化。

（2）三山岛矿区、玲珑 207 号脉交代柱的形成表现出两者有相近的形成机理，随水逸度的增高，碱性长石不稳定，其中 K、Ca、Na、Al 等组分发生活化，从而形成大量的绢云母，当原岩中钠长石消失殆尽时，绢云母的含量最多，达 40% 以上；巨量的含水矿物生成，消耗大量的水，是引起流体浓缩的主要途径。

4 结论

区域蚀变断裂带的岩石学和地球化学研究表

明，具有明显条带状的构造蚀变岩是在深成上升流体流的作用下、在一定构造应力场条件下形成，用构造变形岩相形迹可以表达它们的分布。矿源岩系的大比例尺构造变形岩相形迹填图发现，交代蚀变早期的应变场主变形面走向呈 NE 方向延长分布，而在交代蚀变构造岩形成的后期阶段，构造应力场发生近于正交反转，在部分地段形成矿化岩带或矿床，矿石多为角砾状、网脉和细脉浸染状[10,13]。流体浓缩的实例资料表明，后期流体浓缩与外界应力场转为松弛张裂环境使得另一介质流入并引起电解及稀释作用继而发生了沉积成矿。

（1）在挤压条件下，流体组分、成岩组分和成矿组分的质量转移形成所谓‘薄膜机制”，条带中形成了具含矿碱性热液蚀变面貌的同构造期交代岩，这些交代岩既是一个具有一定级别次序且有疏导组构转移流体的系统，也是糜棱岩或剪切岩带交代变质系统。本研究所注重的变形蚀变岩就是指这一类碱性热液交代岩。构造变形岩相形迹的组合及变化能反映成岩成矿过程，利用它开展地质填图是一新的地质研究和找矿预测方法。

（2）在交代蚀变后期，构造从韧性变形为主向脆性变形发育转变，应力场由压剪性转化为张剪体制，有人称之为应力松弛。在压剪体制下形成矿化碱性热液阶段片岩、叶理状细纹岩，在张剪条件下热液性质转为偏酸性，一般为石英-硫化物阶段，石英-多金属阶段及碳酸盐阶段，后者多叠加在前者之上，主要形成脉状、细脉状和浸染状工业矿化。

（3）选择不同成矿阶段的产物开展含矿节理观测，并特别注重对充填在引张带的构造脉体测量，可以恢复不同阶段的构造应力场及最大主压应力方向。

（4）酸性淋滤交代带的产生喻示着强烈的水合作用，成矿溶液与围岩反应，生成富水富硅的矿物相，在相对封闭的水-岩系统中，促进了水的浓缩作用。在酸性淋滤交代建造中水合作用依绢英岩—次生石英岩—泥化岩的顺序增强，并依次强化了水的浓缩作用使成矿流体趋于饱和 绢云岩带结合的水量一般不超过 2% ~ 3%，这就意味着初始成矿流体不一定有很高的金属浓度，即使是水溶液中有 10×10^{-9}浓度（质量分数）的金，经千倍浓缩可达到 10 g/t 的金品位。

（5）在相对封闭的构造空间中，交代带形成过程中水的消耗、内压降低及构造趋于开放等变化，必然导致新的成矿溶液或天水涌入，造成残余流体的骤然稀释，从而引发金属矿质的大规模淀积 流体的沸腾也是成矿溶液收缩的重要途径，沸腾作用不仅改变了体系的物理化学状态，也使成矿流体浓缩。

（6）水-岩反应、交代带形成过程中水的浓缩作用主要发生在两种地质体交接部位及两个热液体系接触蚀变阶段。其一是在含水主构造带中，这种浓缩是依靠构造带中水向周围岩区渗流扩散完成的，另一种是含矿溶液向外渗透、扩散过程中，借助孔隙溶液弥散于岩石孔隙中，处于这种位置的空隙溶液有很高的岩/水比，通过溶液反应发生了孔隙溶液的浓缩和金属元素的淀积，这就是在交代作用的前锋和交代相的相界处均易导致金属矿化的原因。沿交代剖面可以在早期韧脆性构造中发现形成在晚期脆性构造中的主矿体，其旁侧脆性构造发育，配套裂隙断裂控制了若干较小矿体的分布，随交代宽度增大特别是交代相变异的增强，侧列的小矿体数目也增多。

（7）尽管热液金矿早期交代蚀变和成矿期的岩石变形特征明显不同是较普遍存在的，但是，成矿构造应力场转变是区域性的？还是局部性的？是应力松弛造成的还是岩石交代后的岩石力学性质变化？是构造应力场的转变还是构造应变阶段性的变化？这些问题尚待深入研究。然而，成矿期发生应力状态或称之为动力学状态的突然变化导致挤压带中蚀变岩发生张裂、热液沉淀成矿的事实是值得注意的。

（8）成矿流体地质过程是非常复杂的，本文仅通过构造变形岩石室内外测量的实例研究，从恢复应力的分布与演化及含水矿物产生的方式等方面研究了与岩浆热液有关的脉状金矿的成矿作用，对于更复杂的问题还有待深化。

构造应力场转变与流体浓缩-稀释耦合的成矿作用，对于一般热液金属矿床及其控矿构造研究来说都是值得重视的问题。

感谢郭文魁、宋叔和、孙殿卿、陈庆宣、杨开庆、李廷栋、翟裕生、马宗晋、欧阳自远、常印佛、任继舜、陈毓川、裴荣富、肖庆辉和刘瑞←等师长们的长期指教与帮助。

参考文献：

[1] 张国伟，周鼎武，于在平．大陆造山带成因研究[A]．当代地质科学前沿[C]．武汉：中国地质大学出版社，1993．145-153．

[2] 陈衍景．影响碰撞造山成岩成矿模式的因素及其机制[J]．地

学前缘，1998（增刊）：109-117.
[3] 杨开庆.构造带的特征与超基性岩体的铬铁矿的分布关系[J].地质力学论丛，1979(5)：44-57.
[4] 吕古贤，邓军，郭涛，等.玲珑-焦家式金矿构造变形岩相形迹大比例尺填图与构造成矿研究[J].地球学报，1998，19(2)：177-186.
[5] 李德威，赵温霞，张天平，等.滇中多尺度地质异常的构造背景场[J].地球科学，1998，23(2)：137-140.
[6] 罗元华，孙雄.不同应力状态下地层渗透系数的变化及其对流体运移影响的数值模拟研究[J].地球学报，1998，19(2)：144-149.
[7] 张均，陈守余.焦家金矿田的成矿构造物理化学场结构分析[J\Ⅱ].地球科学，1998，23(2)：120-124.
[8] 林文蔚，殷秀兰.成矿流体的浓缩作用和浓缩方式[J].地球学报，1998，19(2)：158-165.
[9] 吕古贤，孔庆存.胶东玲珑-焦家式金矿地质[M].北京：科学出版社，1993.256.
[10] 吕古贤，林文蔚，罗元华，等.构造物理化学与金矿成矿预测[M].北京：地质出版社，1999.458.
[11] 杨敏之.金矿床围岩蚀变带地球化学——以胶东为例[M].北京：地质出版社，1998.1-120.
[12] 杨敏之，吕古贤.胶东绿岩带金矿地质地球化学[M].北京：地质出版社，1996.1-221.
[13] 吕古贤.构造物理化学基本问题与金矿成矿预测[J].地球学报，1998，19(2)：117-125.
[14] 方金云，姚书振，陈宗信.山东省莱州市望儿山金矿床构造-矿化模式研究[J].地球科学，1996，21(6)：614.
[15] 吕古贤.胶东半岛构造-岩相形式及玲珑-焦家式金矿的构造动力成岩成矿地质特征研究[J].中国地质科学院院报，1991(23)：65-80.
[16] 姚凤良，刘连登，孔庆存，等.胶东西北部脉状金矿床[M].长春：吉林科学技术出版社，1990.1-234.
[17] 张蕴璞.胶东焦家式金矿地质特征及找矿模式[A].国际金矿地质与勘探学术会议论文集[C].沈阳：东北工学院出版社，1989.358-362.
[18] 裘有守，王孔海，杨广华，等.山东招远—掖县地区金矿区域成矿条件[M].沈阳：辽宁科学技术出版社，1988.1-291.
[19] 王鹤年，汪耀，陈延安.胶东西北部混合岩、混花岗岩及其与金矿化的关系[J].南京大学学报，1988(增刊)：29-40.
[20] 马启波.山东招远—掖县地区重熔型岩浆期后热液金矿床的近矿围岩蚀变与成矿条件[J].沈阳地质矿产研究所所刊，1984，9号：31-43.
[21] 赵一鸣，林文蔚，张德全，等.交代成矿作用及找矿意义——几个重要含矿交代建造的研究[M].北京：北京科学技术出版社，1992.
[22] 林文蔚，赵一鸣，赵国红，等.胶东西北部金矿的控制因素[J].矿床地质，1997，16(2)：107-119.
[23] КРАИНОВ С Р，РЫЖЕНКО Б Н.林文蔚译.与有争议的地下热水地球化学问题有关的具有挥发性阴离子(Cl，S，C)团的花岗岩/水体系地球化学过程的模拟[J].国外矿床地质，1997(1)：1-15.
[24] 张德全，李大新，赵一鸣，等.紫金山铜金矿床蚀变和矿化分带[M].北京：地质出版社，1992.
[25] 林文蔚.岩(矿)石中真实矿物组成的计算及矿物化学成分的初步逼近[J].岩石学报，1987(2)：37-51.

TRANSITION OF STRUCTURAL STRESS FIELD AND INSPISSATION-DILUTION OF HYDROTHERMAL FLUID IN GOLD MINERALIZATION

LÜ Gu-xian[1]， LIN Wen-wei[2]， GUO Tao[1]， YIN Xiu-lan[1]， SHU Bin[1]， GUO Chu-sun[1]
（1. *Institute of Geomechanics*，*CAGS*，*Beijing* 100081，*China*；2. *Institute of Mineral Deposit*，*CAGS*，*Beijing* 100037，*China*）

Abstract：Based on the study of field and indoor analysis，the authors further proved that many industrial hydrothermal gold orebodies were formed in tensile stress environment. Large-scale geological mapping and measuring of tectonic deformation facies showed that the hydrothermal alteration in the early stage occurred in compressive shear structural belt，and the major industrial orebodies were formed in the later stage in tensile shear belt. The transition of the stress field in the two stages proceeded almost orthogonally. From the systematic analyses of rock，mineral and fluid geochemistry in Linglong，Sanshandao and other deposits，the authors found that almost in all mid-to-large type of hydrothermal deposits there have been intense inspissation of ore-forming fluid based on the hydrothermal alteration. The initial low-density ore-bearing fluid turned into a replacement belt with water-rich minerals by the water/rock reaction，which

made the free-water in the fluid inspissated heavily；additionally，through the reaction with C，S etc.，more free-water was consumed，and the boiling of fluid by the pressure relief further reduced the free-water content. All these factors caused the metal density in the residual fluid increased. When the inspissation of water/rock system was coupled with the transition of the stress field from compressive into tensile and with the inflow of fresh fluid，the subsequent dilution of the fluid would cause the metal sulfide to be deposited.

Key words：hydrothermal gold deposits；transition of structural stress field；inspissation-dilution of hydrothermal fluid；Linglong-Jiaojia type of gold deposit in Jiaodong Area

应用三维地震层速度棱边异常技术预测压力异常

林金逞[1]，崔 刚[1]，田世澄[1]，郎淑敏[2]，周大勇[2]，朱庆忠[2]，杨合义[2]

（1. 中国地质大学 能源地质系，北京 100083；2. 中国石油股份公司 华北分公司，河北 任丘 062450）

地震波波速与岩石物性、流体性质、岩层的埋深及地质构造都有密切的关系，反之，利用地震波传播速度及其横向变化可以反演地质现象（刘企英等，1994）。在成藏动力系统划分中，由于钻井分布和数量的限制，使得成藏动力系统的划分多停留在二维的阶段（田波等，1999）。应用三维地震处理过程中得到的速度谱数据体，进行压力异常的预测则可以较好地解决这一问题。低速异常带较大可能证实异常高压的存在，应用棱边算法能够非常清楚地显示异常压力的范围，为划分成藏动力子系统提供一种非常直观的依据。

1 方法

应用地震层速度之前，要对三维地震资料进行二维网格平滑，平滑需两步完成：

（1）设计二维平滑网格，求网格内的平均层速度值。该过程由下式完成：

$$\bar{V}_{pq} = \frac{1}{mn}\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} V_{p+j-k_2,\,q+i-k_1} \tag{1}$$

其中 $p=1,2,3,\cdots,p$；$q=1,2,3,\cdots,q$；$j=1,2,3,\cdots,m$；$i=1,2,3,\cdots,n$。

（2）对上述计算得到新的层速度矩阵用下式再进行二维平滑：

$$\bar{V}_{pq} = \frac{\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} \bar{V}_{p+j-k_2,q+i-k_1} W_{ji}}{\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} W_{ji}} \tag{2}$$

p 为纵向计算总点号，q 为横向计算总点号，m 为纵向平滑网格点数，n 为横向平滑网格点数。

应用平滑后的层速度数据体在工作站上应用 LANDERMARK 解释系统中的 poststake 模块进行速度异常处理，其中基本原理依据棱边异常公式（3），应用 poststake 模块对层速度进行再处理后效果明显，使异常边界在剖面上有明显的响应。

$$\nabla^2 u = \partial^2 u/\partial x^2 + \partial^2 u/\partial y^2 \tag{3}$$

2 应用实例效果分析

本次研究采用了位于廊固凹陷中部的王居油田三维地震资料重新处理速度谱数据体。钻探证明区内纵向上发育的沙一下到沙二上段泥岩、沙三中上泥岩及明化镇中部泥岩是区域内的三套主要盖层。处理后的数据体剖面垂向上具有两个较明显的异常带，且该异常被断层所分割。与地震剖面相比，处理后的剖面在垂向与横向上有明显的异常，而在地震剖面上是看不到的；与层速度剖面对比，地质异常出现的位置则对应于层速度由高值到低值的变化部位；与实际地质分层资料对比该异常值则对应于沙二—沙三上的泥岩段下部。说明沙二—沙三上的泥岩段将其上下地层分为两个动力系统，并且断层将横向上连通的动力系统一分为二，显示出本区的断层具有分隔作用。

虽然这种方法应用于成藏动力系统研究尚在探讨中，但是所取得的效果对于预测地层中的异常压力分布带，从三维上较准确地划分成藏动力系统，揭示异常压力带在地下的展布形态及特征有较好的启示。对丰富和完善成藏动力学系统理论也有意义。