

第二阶段（脆性剪切-成矿阶段）：在 NW-SE 压应力作用下，岩石从塑性流动向碎裂流动转变。NE 向虎家尖构造带由塑性剪切向脆性剪切（顺扭）转变，即在 NE 向密集折劈带基础上发育为 NE 向剪切破碎带，由一套具有碎裂流动构造的碎裂岩、碎斑岩带组成。在脆性剪切变形应力集中区，岩石渗透率相对增高导致 Ag、Au、硫、砷化物流体向此应力集中区迁移并高度聚集，成为银、金高品位区，构成碎裂、碎斑、脉状等具碎裂流动构造的矿石。

第三阶段（脆性张剪-成矿阶段）：在 NE-SW 向压应力作用下，地壳浅部的 NE 向虎家尖构造带由脆性剪切向脆性张剪转化，沿 NE 向剪切面发生启张，造成大量  $\text{SiO}_2$  流体沿之形成大量梳状石英脉和张性角砾岩带。在这种脆性张剪叠加区，岩石渗透率相对最高，导致 Ag、Au、硫、砷化物流体沿其迁移和集中，构成该成矿带中最高品位区，形成条带状、脉状、角砾状富矿石。

## 2 从塑性向脆性变形-成矿阶段演化过程中，银金元素迁移聚集的微观机制

（1）揭示银金的富集部位、赋存形式与岩石流动之间的关系，阐明变形-成矿过程中，Ag、Au 元素活化迁移聚集的形变相变机制：①构造成矿带从塑性流动向碎裂流动的转变过程中，流体、变质反应、碎裂流动和晶体塑性流动之间的相互作用，能量转变作用，造成了银金元素的活化，并逐渐向塑性变形的高应变区和脆性变形的应力集中区迁移聚集成矿。②塑性剪切变形的高应变区由千糜岩和石英质糜棱岩带组成，其内石英晶格位错密度较高（ $\rho = 165 \sim 211 \text{ cm}^{-2}$ ），形成大量晶格缺陷，能谱分析含 Ag 0.5%~2.19%，这是导致银活化迁移聚集的超微机制，构成银金的高丰度带。③脆性剪切变形的应力集中区，由一套具有碎裂流动构造的碎裂变质岩带组成，构成银金高品位区，为主矿体。④脆性张剪破裂叠加区，由具有梳状构造、石英脉和角砾岩带组成，构成银金最高品位区。

（2）石英脉的类型是不同变形-成矿阶段和矿化富集程度的标志：在变形-成矿演化过程中，石英脉有从古石英脉→网脉→梳状、晶洞、晶簇状石英脉转变的特点，其石英结晶度、 $\text{CO}_2$  与  $\text{H}_2\text{O}$  光密度比值（红外光谱测定）升高，银金品位也随之升高。

（3）矿石结构构造类型也是不同变形-成矿阶段和矿化品位的标志：在变形-成矿演化过程中，矿石的结构构造有从塑性流动构造（浸染状、条纹状、透镜状）→碎裂流动构造（碎裂、碎斑、脉状）→脉状、条带状、角砾状构造演变的特征，其银金品位有升高的趋势。

根据以上所述，对于银金矿的找矿方向，首先应该寻找北东向塑性剪切带的高应变区，在此基础上确定有脆性变形叠加的应力集中区做为指导找富矿体的靶区。

# 构造应力场与成岩成矿同步演化研究的进展

王建平

（中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081）

矿田构造学工作的中心应该在时间和空间上把握住成岩成矿与构造同步演化的关系。近代构造学将全球构造、区域构造和控制矿田、矿床、矿体的构造，乃至某些矿石结构构造、金属元素在矿石中的赋存状态，都归结于构造应力场及其变化所造成。80 年代以来，我国

矿田构造和构造应力场方面的研究有了深入发展,翟裕生(1981、1984、1993)、陈国达(1986)、孙殿卿(1987)、池三川(1988)、沈淑敏(1993、1994)、万天丰(1988、1993)等学者的专著问世,体现时代要求,这两方面的理论和实践都有长足的进步,并日趋紧密结合。

在地质力学构造体系控矿理论基础上,杨开庆(1982、1984、1986)提出“动力成岩成矿”理论,是构造应力场与成岩成矿机理建立联系的先导。该理论认为构造不但是控岩控矿条件,而且还能成岩成矿。它以构造动力引发与地壳物质调整的关系为研究的总方向,以构造运动中的成岩成矿过程为主攻对象,以形变与形成、建造与改造、构造与岩相等彼此的成生演化规律的地质历史分析为基本方法。与此同时,经陈国达、涂光炽、杨开庆倡导,在我国开创了构造地球化学研究方向(专题论文集见1984,《大地构造与成矿学》,vol.8, No.4),成为矿田构造学的姐妹学科。应用构造地球化学、动力成岩成矿理论做矿田构造研究,要求对控岩控矿构造应力场作准确分析,进行岩石力学和成岩成矿实验,以及构造应力场的相似模拟和数学模拟(专题论文集见1986,中国地质科学院地质力学研究所所刊, 7)。

仅举两例为代表,以说明构造应力场与成岩成矿同步演化研究的内容和方法。

(1) 在正岩浆矿床研究中,岩体在先成区域构造中被动侵位条件、主动侵位形成的构造、岩浆分异矿体停积及再侵位的动力学等,都是矿床学、矿田构造长期研讨的课题(池三川,1979;李开善等,1981;甘肃六队,1984;芮宗瑶等,1984;李尚淮等,1986)。为预测隐伏含矿岩体,我们曾首次对围岩中的褶皱干扰样式作流变学分析,补充了成矿后构造应力场继续演化的研究内容(马天林等,1993)。

在新疆额尔齐斯断裂带东端南侧的喀拉通克岩浆型铜镍矿床,华力西中晚期含矿基性杂岩带沿NW向深断裂侵位,多条NNW向分支断裂与主干断裂交汇部控制单个岩体及大岩体内晚期熔离富矿体所在位置,被命名为成岩期反Y状断裂构造型式。岩体侵位后下石炭统围岩地层继续发育强烈地NW向平面层流褶皱,至使难以用断裂控岩规律在矿区外围预测隐伏含矿岩体。该区处于西域系与蒙古弧形构造西翼的复合部,最大主应力为NNW方向,与主构造线斜交,使岩体间、岩体上方的地层褶皱受岩体干扰,局部轴线成近EW走向。畸变的褶曲在岩体两侧成压力影状延长,在约1.5个岩体长轴距离外尖灭归并到NW向主褶皱系中;SN两个岩带间,压力影状褶曲首尾相接,成为斜跨层流主褶皱系上的成岩后斜梯状褶皱构造型式;在矿区西外围受1号岩体轴线变化和成岩后横断裂影响,层流褶皱系被改造成膝状褶曲区。

该项研究的基础工作是地层组段划分后的构造填图,并靠航片解译向矿区东西两侧外推调绘地质构造概图。确定褶皱的流变方式主要采用小褶曲枢纽、交面线理和拉伸线理测量,区分出垂直层流和平面层流两类褶皱运动学差异。测算标志体的三维有限应变,求出褶皱流变几何学定量数据。借助岩石力学和地应力研究获得有关参数,设计数学模型作有限元计算,拟合算出岩体附近压力影状褶曲区和正常主褶皱区应力分布特征,得到动力学模型。然后据压力影状畸变褶曲发生在隐状岩体上方和侧面的认识,结合热蚀变及物探、化探资料预测隐伏岩体,并于新疆305项目I-1-1专题报告(1989)提交前,在1号靶区经钻探得到验证。

从构造地质学方面看,1988年美国地质学会彭罗斯会议(见《Geology》,1989,

No. 5) 设花岗岩内部及周围的构造型式、围岩变质作用与形变之间关系等两个议题, 也提出发现同构造岩体间、岩体外的围岩成“应力影”状。可见, 就成岩后的围岩中压力影状褶曲和斜梯状褶皱构造型式深入作构造流变学研究, 具有理论的和现实的意义。

(2) 对水热脉状矿床的研究要考虑内生金属成矿过程的诸多因素, 如火山-岩浆建造、变质建造和沉积建造的改造演化, 幔源物质影响以及天水参加深部循环等问题, 再加上温压地球化学、同位素测年、稳定同位素等技术方法的进步发展, 使多元成矿、多阶段成矿思想大为活跃, 并形成矿床的成矿系列理论(程裕淇等, 1983)。与成矿系列理论相匹配的多阶段控矿构造应力场的精细厘定, 也同样是近年我国矿田构造研究进展的重要方面(曾庆丰, 1978; 刘钟伟等, 1983; 林新多, 1985; 翟裕生, 1991; 万天丰等, 1990)。同时, 矿田构造研究则企图通过运动学、动力学分析, 在同一水热成矿期内的各个矿化蚀变阶段建立起对应的定量构造应力场(王建平等, 1992)。

在辽宁西部和内蒙古赤峰边界的金厂沟梁金矿田, 它包括产于太古宙变质岩块、印支期花岗岩体、燕山期火山岩盆地等3个水热成因脉形金矿床。矿田中心是一个膨胀上升主动侵位的燕山晚期花岗岩株; 环状构造控制其外部相和印支期岩体中的斑岩型金铜钼矿化及晚期碱性脉岩; 放射状断裂距岩株中心1.2~3.6 km范围内充填硫化物蚀变岩型金矿脉及成矿期和成矿后各类脉岩。我们对其中内蒙古金厂沟梁金矿床重点作了构造控矿分析, 认为成岩成矿过程与构造演化具有极好的同步相关性。

该金矿床经历过太古宙晚期、印支期、燕山期3个主要的构造、岩浆、变质、变形期。当中心岩株张力造成锐角小于 $30^\circ$ 的共轭断裂系统向透镜状网络系统转变过程中, 矿化类型依次为硫化物石英脉型、碎裂蚀变岩型、糜棱蚀变岩型、糜棱蚀变岩型, 矿化形式依次为充填状、透镜状、角砾状、流动状。着重联系矿化蚀变分期, 追溯重塑了6期定时、定向、定量的古构造应力场。历史最大主应力方位变化是依据详尽的构造解析并参考震源机制解所作的动力学分析, 最大主应力量值是运用声发射历史地应力测算(丁原辰等, 1991)和晶格位错、包裹体温压法等。通过控矿构造型式厘定、有限元数学模型计算, 分析差应力变化、主应力等值线奇异点用于盲矿预测。三年来施工6条穿脉探矿坑道工程, 完成1100 m, 验证了6条预测矿脉均达到工业可采标准。同时我们认为控矿脆性断裂发生时的最大主应力主要对应于岩块埋深, 保留10~15 km深的弹塑性域、5~10 km深的粘弹性域暂不考虑, 研究报告只计算了5 km深脆性域范围、地勘求储水平以下的深部资源量。这是目前国内金矿成矿深度估计的一种全新的定量方法。

显然, 若不是矿业界的要求, 地质学家只会对变质岩区作 $P-T-t$ 轨迹曲线、在油田作烃成熟度有关的埋深与地温变化分析有兴趣, 而不会对金属矿田以 $6 \times 10^6 \sim 60 \times 10^6$  a时间分期, 测算出每期20 MPa变化范围的最大主应力量值。显然, 也正是矿业界需要, 我们才首次将工程界始用的声发射地应力测量技术移置到地质分析中, 并将其新发现的抹录不净效应应用于多期历史地应力估测。

由此可见, 构造应力场演化历史中, 构造体系、构造型式不断繁衍出新的类型和样式, 从而以不同方式控制着岩体、矿体的形成和定位。80年代以来, 我国矿田构造在上述构造应力场与成岩成矿同步演化研究的进展是显著的, 并将分别促使矿床学、构造学及有关技术方法的进步。