

场, 温度梯度导致海水对流。设  $n$  为温度场法线 (辐射状) 上两点的间距,  $\Delta T$  为该间距上的温度差, 则温度梯度为:

$$\text{grad}T = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta n} = \frac{\partial T}{\partial n}$$

在三维热力场中, 若  $n$  与  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴间夹角分别为  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ , 其分梯度则为:

$$\partial T / \partial n = (\partial T / \partial x) \cos \alpha + (\partial T / \partial y) \cos \beta + (\partial T / \partial z) \cos \gamma$$

热力场的形成遵循傅立叶导热定律, 设  $A$  为截面积,  $Q$  为通过该截面的热流量,  $q$  为热流密度 ( $\text{Cal} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ),  $x$  为单向导热,  $\lambda$  为导热系数 ( $\text{w} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ ), 则:

$$q = Q / A \quad q \propto dT / dx$$

$$q = -\lambda (dT / dx) \quad Q = \lambda A (dT / dx) \quad (\text{傅立叶导热定律})$$

式中负号代表温度降低方向。水的导热率为  $0.556 \text{ w} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

(4) 海底喷溢成矿物质分配律: 自喷溢中心向外围存在着温度差, 则导出压力差及密度差, 引起含矿海水对流, 能量随之传递。热流温度因冷流冷却而逐渐降低, 热流能量释放, 矿质沉淀。按热力学第二定律, 在高温向低温的传递方向上, 熵 ( $S$ ) 逐渐增大, 混乱度 ( $D$ ) 也随之渐大, 质点间碰撞机会则多, 导致矿质沉淀。其冷却遵守牛顿冷却定律, 若  $A$  为热流与冷流的接触面积 (换热面),  $Q$  为通过该面的热流量, 热流温度  $T_D$ , 冷流温度  $T_W$ ,  $\alpha$  为换热系数 ( $\text{cal} / \text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ ), 则:

$$Q \propto A \Delta T \quad Q = \alpha A (T_W - T_D)$$

自然对流水的换热系数为  $200 \sim 500 \text{ kcal} / \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 。熵与混乱度的关系为:  $S = k \lg D$

其二, 海盆地这个体系, 所以能不断释放能量而引起矿质沉淀 (卸载作用), 是由于喷溢能量的不断补充, 一旦喷溢结束, 成矿也随后结束。设喷溢补充能量为  $\Delta U$ ,  $Q$  为海水体系吸收热,  $W$  为体系作出的功, 则:  $\Delta U = Q - W \quad dU = \delta Q - \delta W$

由于喷溢 (浆、液、气) 是阵发性的, 也就出现了多层矿化。

其三, 喷溢前, 海盆地中有稳定的  $T$ 、 $P$ 、 $\text{pH}$ 、 $\text{Eh}$  值的平衡分布, 即平衡物理化学场。在正常情况下, 该场是海水深度的函数。当海底喷溢, 海水局部被喷出硫酸化; 生物随死亡分解, 海水局部  $\text{Eh}$  值降低。于是, 物理化学场将会出现“破旧立新”, 这种作用主要是通过海水对流而实现的。在海水对流过程中, 各种物质按自身的物理化学要求在新的物理化学场中沉淀。一般说, 自深水到浅水, 自喷溢中心至外围, 出现硫化物  $\rightarrow$  碳酸盐  $\rightarrow$  氧化物的水平分带。

## 川字型海底喷溢成矿构造体系

王思源

(中国地质大学, 武汉 430074)

### 1 概述

“川字型海底喷溢成矿构造体系”意指克拉通上的扭裂带, 强拉张成裂谷系, 导致深源物质喷溢, 经热力场作用而成矿。其特点是控矿的诸裂谷大致平行成川字型, 各条裂谷中的矿田则受次级断裂控制, 沿裂谷呈串珠状。本文以作者近年研究的狼山造山带为例。

狼山造山带位于华北地台北缘的阴山西段,呈向北凸的弧形带(狼山弧)。可分三带:中带为新太古界乌拉山群片麻岩及混合岩类,黑云斜长片麻岩 Sm-Nd 年龄  $2735 \times 10^6$  a;北带为中元古界狼山群绿片岩(基性火山岩)、千枚岩含斜长角闪岩类,后者 Sm-Nd 年龄  $1492 \times 10^6$  a;南带为中元古界狼山群碳质板岩、白云岩夹角闪片岩(基性)及石英角斑岩,后者 Pb-Pb 年龄  $1144.6 \times 10^6$  a。中元古代 ( $1800 \times 10^6 \sim 1000 \times 10^6$  a),以狼山断片(中带)分隔,于南北两裂谷中成矿,南带有东升庙、炭窑口 PbZn-FeS<sub>2</sub> 矿田,北带有霍各乞 Cu-多金属矿田及那仁宝力格等 Pb 矿床。矿化的基本特征是:下部火山岩,中部为热水沉积岩夹多层矿体,上部为石英岩。前人曾据本区有海西期花岗岩而认为是花岗岩浆热液成矿,其后又有区域变质说。由于海西期花岗岩切矿,层状矿体与地层同步褶皱,说明成矿在中元古代。

2 喷溢成矿构造盆地类型

(1) 狼山北带构造盆地判别:表 1 为狼山中元代火山-侵入岩化学成分,计算  $\sigma$  (碱指数)、Na/K、FeO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 值,细碧岩的为 2.67、1.1、4.16,斜长角闪岩的为 1.08、7.72、4.19,为钙至钙碱性的、富 Na、富 Fe<sup>2+</sup> 的幔源物质。在 Glassiey (1974) 的 (FeO<sup>\*</sup>/MgO)-TiO<sub>2</sub> 变异图中,细碧岩落入“岛弧拉斑玄武岩区”,少数与斜长角闪岩一起落入“洋中脊拉斑玄武岩”区;在 J A Pearce (1976) F<sub>1</sub>-F<sub>2</sub> 及 F<sub>2</sub>-F<sub>3</sub> 图解中,斜长角闪岩全部落入岛弧环境。岩石化学判据表明,北带为与陆缘岛弧有关的洋壳化了的构造盆地。

表 1 狼山造山带中元古代海底火山-侵入岩化学成分 (%)

序号	岩性	样数	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	$\sigma$
1	细碧岩	10	50.16	0.95	13.99	1.66	6.90	0.15	5.22	7.83	1.85	2.52	0.13	2.67
2	斜长角闪岩	7	47.95	1.66	16.30	2.04	8.54	0.22	7.19	11.41	1.93	0.38	0.23	1.08
3	石英角斑岩	5	71.70	0.11	14.60	0.24	1.88	0.10	0.38	1.23	4.48	2.13	0.13	1.52

注: 1~2 为霍各乞矿田样品,细碧岩经区域变质为绿泥石片岩; 3 为东升庙矿田样,石英角斑岩区域变质为石英钠长变粒岩

表 2 为北带海底火山-侵入岩稳定微量元素,它们落入 J A Pearce Ti-Cr 图解 (1975) 的“岛弧拉斑玄武岩”与“大洋海底玄武岩”的过渡部位,落入 Ti-Zr (1982) 图解的“火山弧熔岩”与“洋中脊玄武岩”的交接处,也说明是岛弧附近洋壳化了的构造盆地。

表 2 狼山北带霍各乞矿田中元古代基性岩类稳定微量元素 (10<sup>-6</sup>)

序号	岩性	Cr	Ni	Ti	Zr	Rb	Ta	Yb	Y	Lu	Th
1	细碧岩	343.2	76.0	4363	95	-	-	1.98	18.79	0.29	-
2	细碧岩	66.0	19.0	16525	168	-	1.29	-	-	-	8.6
3	细碧岩	143.0	72.9	7273	108	-	0.11	-	-	-	8.6
4	角闪石片岩	48.7	104.8	6477	90	-	-	2.22	20.24	0.35	-
5	斜长角闪岩	256.6	71.6	6154	109	-	-	2.30	29.83	0.50	-
6	斜长角闪岩	214.0	70.7	6090	110	-	1.90	-	-	-	7.9
7	斜长角闪岩	112.0	29.7	7559	142	-	0.84	-	-	-	9.5

霍各乞矿田基性岩类稀土模式与 L R Cullers 等 (1984) “岛弧及弧后盆地拉斑玄武岩”是一致的;  $\Sigma\text{REE}$  为  $54.91 \times 10^{-6} \sim 125.17 \times 10^{-6}$ , 落在  $10 \times 10^{-6} \sim 262 \times 10^{-6}$  的“岛弧或弧后盆地”范围。

统计表明, 岩浆岩的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  (‰) 值若为 9.4~7.9, 反映为洋-陆板块俯冲带, 而陆-陆板块碰撞带的参数为 10.05~9.9。霍各乞矿田的斜长角闪岩的为 9.4, 随后侵入的闪长岩 (K-Ar 年龄  $772 \times 10^6 \text{ a}$ ) 的为 8.1, 皆落入“俯冲带”。

霍各乞矿田 (北纬  $41^\circ 30'$ ) 于绿片岩相→角闪岩相中发育有 NE-NEE 向红柱石带, 而以北的北纬  $42^\circ \sim 43^\circ$  中新元古界中发育一条 NE-NEE 向蓝闪石片岩带, 两带平行, 构成双变质带, 带间约 35 km, 表明北纬  $42^\circ$  附近为俯冲部位, 其南霍各乞一带应为岛弧至弧后盆地。

在霍各乞矿田发现有长 2750 m 的大型鲍马序列, 其中的砾石为斜长片麻岩。因其主体在北, 末稍在南, 再辅以叠瓦状砾石层判断, 重力流来自矿田北部, 说明北部有海下太古宙的片麻岩高地。符合航磁显示了 NEE 向呼和呼都格隆起区。说明北带裂谷位于呼和呼都格水下隆起与狼山古陆 (中带) 间。裂谷的局部喷发, 构成了水下岛弧盆地, 例如霍克乞。

(2) 狼山南带构造盆地判别: 南带裂谷位于狼山古陆 (中带) 与华北地块 (Ar) 间, 以集宁-临河深断裂分隔。盆地中发育中元古代含石膏白云岩蒸发岩系, 大量重晶石层的出现, 说明了热水喷发沉积的存在。

按 B R Doc (1979) 铅同位素  $\mu$  值, 上地壳为 12.24, 下地壳 5.89, 岛弧 10.87, 地幔 8.92。东升庙矿石铅的为 7.16~8.50, 与下地壳-地幔的吻合。显示幔源混有壳源的喷发性。

以东升庙为中心的南带裂谷, 发现有角闪片岩 (基性) 及残斑变岩 (酸性) 的双峰火山岩, 后者  $\sigma = 1.52$ , 显钙性, 说明为陆缘裂谷盆地。与北带不同。

### 3 川字型海底喷溢构造造成矿动力学机制

(1) 扭裂阶段: 设  $\sigma_2$  为铅垂应力,  $\rho$  为岩石密度,  $D$  为地壳深度,  $g$  为重力加速度。则  $\sigma_2 = g \int_0^D \rho(D) dD$  在地面,  $D=0$ , 则  $\sigma_2=0$ 。显然, 地壳愈浅, 垂直应力愈小。于是, 圈层间的水平错动, 愈靠浅部愈显著。早元古代至中元古代初, 表壳太古界克拉通因圈层错动形成剖面  $x$  断裂, 于平面上呈川字型。

(2) 拉张阶段: 设川型带上一 A 点, A 处地球半径  $R$ , 角速度  $\omega$ , A 点的质量为  $m$ , 与地轴的距离  $r$ , 其离心力  $F$ ,  $F$  沿经向的分力  $f_1$ ,  $\varphi$  为 A 点所处纬度。则:

$$\Delta f_1 = \Delta F \sin \varphi = m R \sin 2\varphi \omega (\Delta \omega / \omega)$$

按角动守恒定律 (李四光, 1969), 当角速度变小, 即  $\Delta \omega < 0$ , 则  $\Delta f_1$  为负值, 指向极地。此时海底扩张, 系列裂谷形成, 地幔物质上涌, 导致海底喷溢成矿。南带矿石异常铅年龄  $2680 \times 10^6 \text{ a}$  及  $1347 \times 10^6 \text{ a}$ , 说明壳铅 (Ar) 与幔铅的混合。

(3) 俯冲阶段: 按角动量守恒原理, 地幔喷溢, 必引起地球自转角速度增大, 形成南北压应力场, 薄洋壳断裂, 于北带北缘俯冲到狼山古陆之下, 于北带形成水下“岛弧盆地”, 洋壳重熔的钙碱性岩浆喷溢, 随后基性岩浆侵入, 是北带的一次重大的构造变革, 形成含矿复理石建造。此时南带, 盆地断裂因挤压而封闭, 基性岩浆无隙侵入, 形成了含矿蒸发岩

建造。若以  $h$  表示洋壳俯冲深度,  $K_2O$  取火山岩百分含量 (按  $SiO_2$  为  $60\omega_B\%$  折合), 按 condie 关系式 (1973):  $h = 89.3 (K_2O) - 14.3$  计算结果, 绿片岩平均为 195.97 km, 斜长角闪岩为 54.58 km, 可取范围 55~200 km, 此深度可达狼山断块 (中带) 下部。

(4) 造山阶段: 中元古代末, 蒙古洋板块向南俯冲加剧, 在华北板块北缘形成压应力场, 狼山北带北侧水下断片 (Ar) 与南带南侧华北断块 (Ar) 对冲于 V 型 (剖面 X 型断裂上半部) 狼山断片 (Ar) 之下, 形成了向中带 (主峰) 对倾的扇状 (剖面) 褶皱带。其机制是大陆边缘洋壳俯冲, 推动陆缘断片间对压造山。

## 大水清金矿田构造控矿特征及金矿预测

方茂龙 童航寿 天 华

(核工业北京地质研究院, 北京 100029)

### 1 区域地质背景

大水清金矿田位于华北地台北缘内蒙地轴东段的喀喇沁断块内。内蒙地轴东段是以 EW 向的赤峰—开源深大断裂和 NE 向的平泉—北票深大断裂围成的锐角地区, 区内 NNE 向断裂发育, 喀喇沁断块即是由 NNE 向的锦山断裂和八里罕断裂切割而成的 NNE 向断块。内蒙地轴东段的太古代变质岩基底称为建平群, 是一套中深变质岩系, 主要由片岩、片麻岩、麻粒岩和混合岩组成; 盖层为侏罗纪和白垩纪火山沉积岩系。岩浆活动有前震旦纪岩浆旋回、古生代岩浆旋回和中生代岩浆旋回。区内金矿化与建平群小塔子沟组及中生代构造-岩浆活动有密切联系。

### 2 矿田构造应力场研究及构造形成机制分析

大水清矿田位于喀喇沁断块北段, 受八里罕断裂的次级断裂——八家子断裂与 NE 向断裂夹持部位控制。矿田内主要发育一长轴为 NW 走向的燕山晚期斑状花岗岩体, 东北部和西南部有小面积小塔子沟组出露。

2.1 矿田主要断裂构造特征 矿田断裂构造主要有 NE 向、NW 向和 NNE 向三组。NE 向构造形成较早, 控制海西期闪长岩体产出, 成矿期活动弱; NW 向断裂活动较晚, 沿断裂侵入的海西晚期斑状花岗岩体切断了 NE 向断层, 岩组分析表明, 该断裂具有左扭性质; NNE 向断裂形成最晚, 广泛发育于斑状花岗岩体内, 在靠近 NE 向断裂处, 走向明显向北东偏转, 表明它们受 NE 向断裂的制约。NNE 向断裂是矿田内的主要控矿断裂, 可分为夹壁墙 (西带)、金洞沟—南大洼—漏风岭 (中带) 和雁池沟—曹家营子 (东带) 三个断裂带。每一断裂带内的断裂常呈左行雁列现象或切错早期伟晶岩脉, 均显示左行扭动性质。

2.2 矿田主要矿化地区的应力场研究 目前对一定范围内的地质构造可以进行两种应力分析: 一是恢复应力场, 了解应力空间分布状况; 二是张量分析, 了解一定范围所受应力的总趋势。为对照研究, 作者同时采用了上述两种方法, 对矿田内的主要矿床分布地区——安家营子矿区 ( $20\text{ km}^2$ ) 进行了构造应力场研究。

(1) 节理统计与应力场恢复: 通过野外节理的分期、配套和观测统计, 恢复了安家营子矿区的构造应力场。这一研究的主要结论如下: ①矿区内 (主要出露斑状花岗岩) 仅发育一套节理组合, 即 NNE 向、NW 向的共轭节理和近 EW 向的挤压面。后期构造运动