

陕西金堆城斑岩钼矿床地质特征 及成因探讨

黄典豪 吴澄宇 聂凤军

(中国地质科学院矿床地质研究所)

内容提要: 金堆城花岗斑岩在燕山期侵位于元古代熊耳群变细碧岩中,按其岩石化学特征应属高硅富钾的钙碱性系列岩石。钼矿化发育于斑岩体及其外接触带内,矿体由含钼石英细网脉组成,最大矿化深度约达1000m。围岩蚀变自斑岩体向外为:钾化、绢(云)英岩化→硅化→青磐岩化,其中以硅化最为强烈且与钼矿化关系最密切。气液包裹体与含子矿物多相包裹体常常共存,主要成矿温度为300—400℃。硫、氧和碳同位素特征表明,主要成矿阶段的成矿流体是以岩浆水为主的混合液,硫、钼主要来源于花岗岩浆。低 f_{O_2} 、高 f_{S_2} 的弱酸性还原条件以及成矿流体沸腾是辉钼矿沉淀的主要因素。矿床成因类型属斑岩型中高温热液钼矿床。

关键词: 金堆城斑岩钼矿床 流体包裹体 稳定同位素 成矿机制

金堆城斑岩钼矿床在国内名闻遐迩,是正在生产的主要钼矿山。就其规模而言,可与世界上任何一个著名的斑岩钼矿床相媲美。我们于1981—1982年对金堆城钼矿床的地质特征、同位素、流体包裹体、稀土配分等作了初步研究。本文试图在前人工作的基础上^{(2)①},结合我们所取得的资料,对该矿床的成矿地质特征及成矿机制进行探讨,并建立其成矿模式。

一、成矿地质背景

该矿床位于中朝准地台南缘的豫陕断隆区内⁽¹⁾。矿区北部分布有太古界太华群片麻岩和混合岩,构成基底构造层(相当于下地壳);南部有中、上元古界长城系铁铜沟组片状石英岩、含云母石英片岩和熊耳群古火山岩,蓟县系高山河组石英岩、龙家园组、巡检司组及杜关组的硅质条带白云岩、白云质灰岩和板岩等。

区内近东西向、北东东—北东向和北西向断裂发育。在燕山期,近东西向构造带复活,伴有大规模的花岗岩浆侵位。该钼矿床的形成与该构造-岩浆作用有关⁽²⁾。

矿区内出露的地层有熊耳群变细碧岩、板岩及凝灰质板岩,其上不整合覆盖有高山河组石英岩。变细碧岩由于金堆城花岗斑岩岩株侵位的影响,发生了接触热变质,形成黑云母化细碧岩和角岩化细碧岩。前者分布于矿区斑岩体的西北部,后者发育于斑岩体的顶部和旁侧,是矿床的直接围岩(图1)。

矿区内的褶皱构造主要是黄龙铺背斜,轴向与近东西向的区域构造线相一致。其轴部为

① 郑延力, 1980, 金堆城钼矿床地质特征

变细碧岩, 两侧为板岩、凝灰质板岩和石英岩。断裂构造发育。走向近东西的断裂有: 北部的燕门凹张性断裂, 它具有多次活动的特点, 形成一张性断裂破碎带; 南部为碌毒沟压性断裂, 倾向南, 倾角 70° 左右^①。北西向($330^{\circ}-335^{\circ}$)断裂倾向南西, 倾角 75° 左右, 它控制着金堆城花岗斑岩岩株和矿区西侧碌毒沟花岗斑岩脉的产出。

矿区内的侵入岩有老牛山二长花岗岩、金堆城花岗斑岩及花岗斑岩脉和辉绿岩脉。二长花岗岩分布于矿区北部的太古界片麻岩及元古代熊耳群变细碧岩中, 其钾-氩同位素年龄为128Ma。

与钼矿床关系最密切的是金堆城花岗斑岩岩株(图1), 它在地表的裸露长度约450m, 宽150m, 呈 330° 左右方向延伸, 倾向北东, 向北西侧伏。它的矿物成分主要为石英(25—40%)、微斜条纹长石和微斜长石(27—40%)、更钠长石(An 8-14, 14—32%), 以及少量黑云母和白云母。岩石呈斑状和聚斑状结构(照片1)。斑晶矿物有钾长石、石英和斜长石。斑晶大小一般为0.5—0.3cm, 最大者达1.5cm。石英斑晶受基质熔蚀现象常见(照片2)。基质由细小的(一般粒径为0.0n—0.1mm)石英、钾长石、斜长石和少量黑云母或绢云母组成。副矿物组合主要为磁铁矿-磷灰石-锆石类型。该斑岩的化学

成分平均含 SiO_2 73.83%, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 8.06%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为1.82, 属高硅富钾的钙碱性岩石系列。需指出的是, 由于难以采集到未受后期热液蚀变影响的斑岩样品, 所以高硅富钾的特征在一定程度上与其硅化和钾化作用有关。这也是国内外含钼斑岩的一个共同特征。

此外, 在该斑岩体的边缘, 见到有密集分布且规模细小(一般宽0.5—1.0mm)的层纹状石英脉, 有的呈褶曲状。在宏观上, 其呈似文象构造(照片3), 镜下呈粒状集合体, 消光方位不一致。在脉壁有微量鳞片状绢云母, 有时可见萤石。这种现象在我国河南上房沟和美国克莱梅克斯、亨德逊等钼矿床中, 均可见及。S. R. Wallace^[7]等把这种岩石定名为条纹岩(ribbon rock), 并认为它是由富水岩浆迅速冷却时组分分凝而形成。而W. H. white^[8]等则称其为细褶皱石英层状岩(crenulate quartz-layered rock), 并基于这种石英脉含萤石, 按

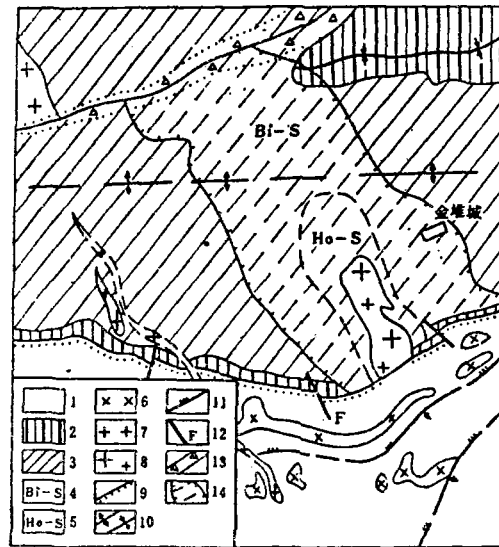


图1 金堆城斑岩钼矿床地质略图
(据原金堆城地质队, 1959)

1—高山河组石英岩; 2—熊耳群变细碧岩; 3—熊耳群板岩及凝灰质板岩; 4—黑云母化细碧岩; 5—角岩化细碧岩; 6—辉绿岩; 7—老牛山二长花岗岩; 8—金堆城花岗斑岩; 9—地层不整合界线; 10—背、向斜轴; 11—压扭性断裂; 12—性质不明断层; 13—张性断裂破碎带; 14—矿体界线

Fig.1. Schematic geological map of the Jinduicheng porphyry molybdenum deposit.

1-Quartzite of Gaoshanhe Formation; 2-Metaspilite of Xionger Group; 3-Slate and tuffaceous slate of Xionger Group; 4-Biotitized spilite; 5-Hornfelsed spilite; 6-Diabase; 7-Laoniushan adamellite; 8-Jinduicheng granite porphyry; 9-Unconformity; 10-Axis of anticline or syncline; 11-Compresso-shear fault; 12-Indeterminate fault; 13-Tensional fractured zone; 14-Boundary of orebody.

① 任海波等(1985)“陕西金堆城钼矿床地质特征”

NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-SiO₂-H₂O系统的矿物关系,对其成因用 P_{H_2O} 和 P_{HF} 的规律性变化,引起石英和钾长石结晶来加以解释。可见,对这种岩石的命名和成因观点尚不统一。尽管对这种岩石的成因尚须作深入研究,但基于其产状特点,和脉中矿物绝大部分是石英,而且萤石并不与石英共结,笔者倾向性地认为,这种条纹岩可能是在岩浆快速冷凝,但仍处于塑性状态下,由富水富硅的热流体所引起的硅交代作用的产物。同时认为,这种条纹岩表征含钼花岗岩的形成深度较浅,并可作为含钼花岗岩的一种特征性岩石结构。

为了解老牛山岩体和金堆城斑岩的全岩稀土元素分配特征,我们采用电感耦合等离子体发射光谱(ICP)分析法测定其REE含量(表1),并按赫尔曼22个球粒陨石稀土含量平均值进行标准化计算。其稀土组成型式(图2)表明,老牛山二长花岗岩、金堆城花岗岩和太华群黑云斜长片麻岩的REE型式基本一致,即均呈一组右倾曲线。从轻稀土(La—Eu)到重稀土(Gd—Lu, Y)含量呈降低的趋势,而轻稀土比重稀土降低得更明显,重稀土组成曲线平缓,表明其分馏程度较低。与老牛山岩体相比,金堆城斑岩的Eu亏损较明显($\delta Eu=0.62-0.35$),且呈重稀土曲线的微弱抬升趋势。这表明后者是由前者分异结晶演化而成。

对老牛山岩体和金堆城斑岩副矿物磷灰石测定的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值分别为 0.7089 ± 0.00012 和 $0.7095 \pm 0.0001^{[5]}$ 。这两个岩体的全岩铅同位素组成分别为: $^{206}Pb/^{204}Pb=17.637$,

表1 金堆城地区花岗岩类岩石稀土元素含量(ppm)

Table 1. REE contents of granitoids from Jinduicheng area (in ppm)

岩石名称	样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy
老牛山二长花岗岩	HD81-103	42.83	79.11	8.09	26.93	4.91	1.01	3.08	0.40	2.20
	HD82-4	50.75	94.44	9.64	33.15	6.22	1.17	4.04	0.47	2.87
金堆城花岗岩	J81-1	26.78	53.22	5.69	19.76	4.32	0.75	3.53	0.46	3.30
	J-13	8.53	17.38	2.72	10.05	3.78	0.41	3.94	0.78	4.71
太华群黑云斜长片麻岩	TH82-II	33.26	64.02	6.96	25.11	4.93	1.12	3.78	0.48	2.98
岩石名称	样品号	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	δEu	$\frac{\Sigma(La-Eu)}{\Sigma(Gd-Lu,Y)}$
老牛山二长花岗岩	HD81-103	0.62	1.39	0.26	1.10	0.12	11.28	183.33	0.80	7.96
	HD82-4	0.79	1.72	0.32	1.37	0.02	14.12	221.11	0.72	7.69
金堆城花岗岩	J81-1	0.93	2.05	0.34	2.20	0.16	20.17	143.7	0.62	3.33
	J-13	0.91	2.69	0.45	3.14	0.48	25.21	85.18	0.35	1.01
太华群黑云斜长片麻岩	TH82-II	0.89	1.74	0.35	1.51	0.15	14.79	162.01	0.83	5.07

除J-13由宜昌地质矿产研究所ICP组分析外,其余均由中国地质科学院岩矿测试技术研究所ICP组谭元缓、阙松娇分析

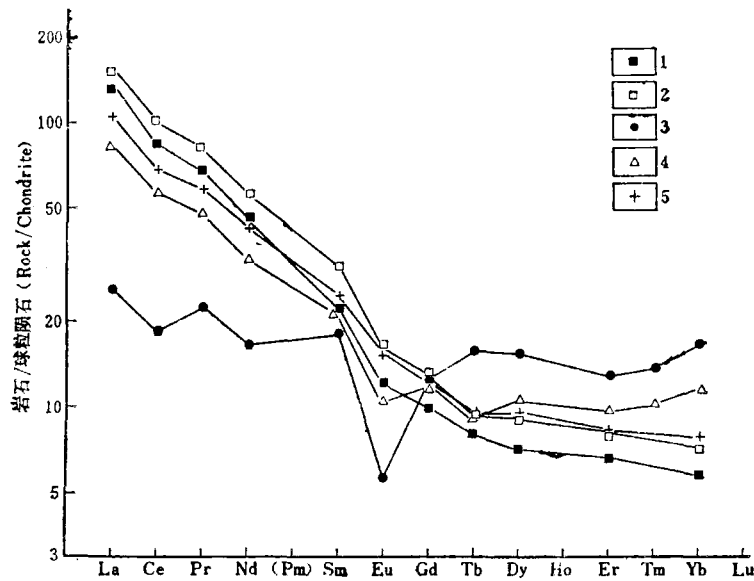


图2 金堆城地区花岗岩类岩石稀土元素的球粒陨石标准化型式

1、2 (HD81-10, HD82-4)-老牛山二长花岗岩; 3、4 (J81-1, J-13)-金堆城花岗斑岩; 5 (TH82-II)-太华群黑云斜长片麻岩。

Fig. 2. Chondrite-normalized REE patterns of granitoids in Jinduicheng area.

1, 2 (HD81-10, HD82-4)-Laoniushan adamellite; 3, 4 (J81-1, J-13)-Jinduicheng granite porphyry; 5 (TH82-II)-Biotite-plagioclase gneiss of Taihua Group.

$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.428$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.940$; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.129$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.511$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.949^{[4]}$ 。可见, 这两个岩体的铈、铅同位素组成数据基本一致。这不仅可以说明它们在成因和成岩物质来源上的密切关系, 而且后者比前者相对富放射成因 ^{206}Pb , 似乎反映它们之间存在着演化关系。

总之, 根据老牛山二长花岗岩和金堆城花岗斑岩产出的地质条件、密切的空间关系、造岩矿物和副矿物组合、岩石化学特征、稀土组成型式, 以及铈、铅同位素组成的近似性, 可判断这两个岩体同属下地壳(太古界基底)经深熔作用所产生的深熔岩浆结晶演化的产物。而且金堆城花岗斑岩以被动高侵位为特征。

二、矿体特征

本矿床的钼矿化发育于斑岩体及其外接触带的黑云母化和角岩化细碧岩内。矿体由不同方向纵横交错的细网脉组成, 细脉的厚度一般为0.2—0.5cm, 个别脉厚达1.0 m。但粗脉钼矿化较弱(照片4)。根据工业指标所圈定的钼矿体, 在平面上呈似扁豆状(见图1), 横断面上的长宽比约为4:1, 最大矿化深度约1000 m(图3)。矿石的钼品位沿矿体的延长方向变化较小, 但沿垂直方向变化较大。一般说来, 钼的品位是随深度的增加而降低。同时, 花岗斑岩体上盘的矿石钼品位比下盘高。在矿体中心部位, 矿脉的密度可达70%, 往外则渐稀, 一般为10—20%。

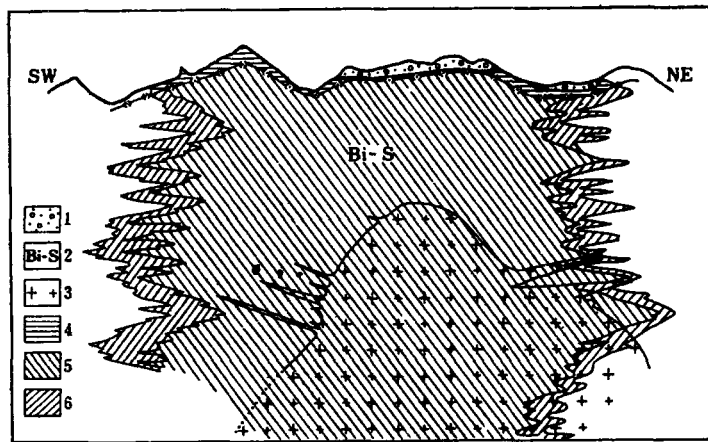


图3 金堆城钼矿体的横剖面示意图 (据原金堆城地质队, 1959)

1—第四系; 2—黑云母化细碧岩; 3—花岗斑岩; 4—氧化带; 5—表内矿体; 6—表外矿体

Fig.3. Diagrammatic cross section of the Jinduicheng molybdenum ore body.

1-Quaternary; 2-Biotitized spilite; 3-Granite porphyry; 4-Oxydation zone; 5-Economic orebody; 6-Uneconomic orebody.

根据矿物组合, 本矿床中的细脉大体上可分为: 黄铁矿-石英脉; 黄铁矿-钾长石-石英脉; 黄铁矿-辉钼矿-石英脉; 黄铁矿-辉钼矿-钾长石-石英脉; 白云母-萤石-黄铁矿-辉钼矿-石英脉等。此外, 在矿体边部可见到充填裂隙的方解石脉或透镜体和沸石细网脉。这两种脉的数量较少且不含辉钼矿。

上述五种主要石英脉往往彼此穿切, 甚至同一阶段和脉石矿物成分相同的矿脉也相互穿切, 这反映出成矿过程的长期性和多阶段性。而这种情况可能是斑岩热液系统演化过程中, 由于岩石静压力和静水压力条件的更替, 导致流体和裂隙多次产生, 矿质反复脉动沉淀所致。而在矿体边部单矿物方解石脉和沸石网脉的形成, 表明成矿过程接近尾声。

辉钼矿在矿脉中的产出方式有: (1) 呈浸染状或斑点状分布于脉石矿物中, 与黄铁矿伴生时, 往往穿切并交代黄铁矿; (2) 辉钼矿叶片有时在矿脉中呈放射状排列; (3) 沿矿脉的两壁呈几乎纯净的辉钼矿薄膜产出, 薄膜可厚达 0.5—2 mm; (4) 辉钼矿与石英呈相间条带分布; (5) 辉钼矿沿岩石的微裂缝充填, 形成微细的辉钼矿脉。

对 5 个辉钼矿单矿物 X 光衍射研究表明, 辉钼矿的多型主要为 2H 和 2H + 3R 型。这与石家湾斑岩钼矿床和河南南泥湖-三道庄斑岩矽卡岩型钼(钨)矿床的辉钼矿多型基本类同。本矿床中 9 个辉钼矿的含铼量为 4.2—26 ppm, 平均为 13.7 ppm; 其中 2 个辉钼矿含铼量为 0.039—0.046 ppm。钼精矿的含铼量为 14 ppm, 含钨为 0.026 ppm。本矿床辉钼矿的含铼量与美国克莱梅克斯钼矿床辉钼矿(含铼 11 ppm) 和亨德逊钼矿床辉钼矿(含铼 7 ppm)⁽⁹⁾ 大体相当。这可说明, 低含铼量的辉钼矿是国内外斑岩型钼矿床的一个共同特点。

钼矿石的自然类型有三种, 即花岗斑岩矿石(占总储量的 25%)、变细碧岩矿石(占 70%)、石英岩和板岩矿石(仅占 5% 左右)。

矿石矿物主要是辉钼矿、黄铁矿, 次要有磁铁矿、黄铜矿, 含微量的方铅矿、闪锌矿、锡石、辉铋矿等。脉石矿物有石英、微斜长石、微斜条纹长石、斜长石、绢云母(白云母)、

黑云母、绿泥石、萤石、绿柱石、方解石、沸石等。表生矿物有褐铁矿、针铁矿、黄钾铁矾、高岭土和铁钼华、孔雀石等。

矿石主要呈粒状结构、残余结构(照片5), 和网脉状(照片6)、浸染状、条带状构造。

对围岩热液蚀变尚未作深入且系统的研究。根据观察大体上具有面型蚀变特征, 即自斑岩体向外, 大致呈现出钾化、绢(云)英岩化→硅化→青磐岩化的分带现象。斑岩体的钾化表现为微斜长石和微斜条纹长石形成聚合斑晶, 斜长石被钾长石交代, 斑岩中含钼石英脉脉壁发育有钾长石单矿物带。绢英岩化形成于斑岩体的顶部, 主要受裂隙控制, 呈不规则的团块产出, 其中有浸染状黄铁矿、辉钼矿和萤石等。硅化作用最为强烈, 表现为纵横交错的石英细脉广泛发育, 多分布于岩体的外接触带围岩中, 同时也叠加在钾化斑岩上。石英脉的发育伴随有钼的矿化富集。青磐岩化离矿化中心最远, 主要见于矿体的边部, 在黑云母化细碧岩中发育有绿帘石、绿泥石, 并有纯净的方解石脉和沸石网脉产出。与钼矿化关系最密切的是硅化, 其次是绢英岩化和钾化。

基于上述的矿石物质成分、结构、构造和围岩蚀变, 把本矿床的形成过程分为气成-热液期、热液期和表生期, 其中以热液期的石英-硫化物阶段为钼矿化作用的最主要阶段, 详见表2。

三、流体包裹体及稳定同位素特征

本矿床的流体包裹体大小一般为8—26 μ m, 最大达40 μ m。其具有斑岩型钼矿床中常见的包裹体类型, 并以气液包裹体、含液体CO₂多相包裹体和含子矿物多相包裹体广泛发育为特征, 表征流体沸腾的气体包裹体与多相包裹体共存现象常见。含子矿物多相包裹体中常见的子矿物有石盐、钾盐、钾长石(照片7)等。值得指出的是, 见到有含子矿物辉钼矿的多相包裹体(照片8)。按子矿物所占包裹体体积估计, 流体的盐度一般为15—40质量%NaCl。

利用西德1350型热台, 对110个气液包裹体和气体包裹体等进行了均一温度测量。加热过程中绝大多数气液包裹体均一化为液相, 而气体包裹体多均一化为气相, 说明成矿作用主要是在液相和气相条件下发生的。所测得的均一温度为240—450 $^{\circ}$ C, 而主要成矿阶段的温度为300—400 $^{\circ}$ C。

我们对本矿床的2件石英样品的流体包裹体作了液相和气相成分分析(表3、4), 结果说

表2 本矿床的矿物生物顺序

Table 2. Formation sequence of minerals in the Jinduicheng molybdenum deposit

矿化阶段 矿物	气成-热液期		热液期		表生期
	液期	石英-钾长石	石英-硫化物	碳酸盐	氧化作用
微斜长石					
微斜条纹长石					
斜长石					
石英					
黑云母					
白云母(绢云母)					
绿泥石					
绿帘石					
方解石					
萤石					
磁铁矿					
黄铁矿					
黄铜矿					
辉钼矿					
方铅矿					
闪锌矿					
褐铁矿					
针铁矿					
黄钾铁矾					
铁钼华					
孔雀石					
高岭土					
沸石					

表3 本矿床石英中流体包裹体的液相成分及离子比值

Table 3. Liquid composition and ion ratios of fluid inclusions in quartz from the Jinduicheng deposit

样品	单位	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ /K ⁺	Ca ²⁺ /Mg ²⁺	Cl ⁻ /F ⁻	Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻
J80-8	μg/10g	0.0	1.60	3.20	0.0	0.0	痕量	0.21	0.53	9.60	0.50	—	2.52	0.06
J8-12	μg/10g	0.0	9.07	10.67	0.75	0.64	27.73	0.69	2.13	25.07	0.85	1.17	3.09	0.09

分析者：中国地质科学院矿床地质研究所程莱仙、陶恭益

表4 本矿床石英中流体包裹体的气相成分(ppm)

Table 4. Gas composition of fluid inclusions in quartz from the Jinduicheng deposit (in ppm)

样号	CO ₂	H ₂	N ₂	O ₂	CH ₄	CO	H ₂ O
J80-8	79.99	0.02	2.63	—	—	—	1280.04
J81-2	51.47	0.05	3.37	—	—	—	1158.91

(中国地质科学院矿床地质研究所周兴汉、徐玉林用国产SP-2305气相色谱仪测定)

明：①本矿床成矿流体不含或贫含Li⁺，Na⁺、K⁺的含量比Ca²⁺、Mg²⁺高，矿床中所见钾化可能是这一特点的表现。②含F⁻，与矿脉中的萤石发育相一致。③在矿物组合中未见到硫酸盐矿物，而流体包裹体中所含的少量SO₄²⁻，一方面是由于分析处理加热样品过程中，包裹体流体中的H₂S、S₂⁻被氧化成SO₄²⁻，另一方面，即使成矿流体中含有少量SO₄²⁻，但在还原成矿条件下，其受到还原作用，所以本矿床中的硫主要是与

钼、铁等相结合成硫化物。④成矿流体中以水占绝对优势，且含有少量的CO₂和N₂。

对本矿床硫化物矿物的硫同位素研究结果^[3]表明：矿化早期的石英-黄铁矿组合， $\delta^{34}\text{S}_p$ 值为+4.5—+5.4‰，平均为+4.8‰。主要钼矿化阶段的黄铁矿-辉钼矿-微斜长石-石英组合， $\delta^{34}\text{S}_p$ 值为+3.7—+5.6‰，平均为+4.71‰， $\delta^{34}\text{S}_m$ 值为+3.8—+4.5‰，平均为+4.1‰；黄铁矿-辉钼矿-微斜长石-萤石-石英组合， $\delta^{34}\text{S}_p$ 值为+4.6—+5.2‰，平均为+4.8‰， $\delta^{34}\text{S}_m$ 值为+4.2—+4.5‰，平均为+4.3‰。晚期方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}_{Gn}$ 值为+0.8‰。可见，本矿床硫化物矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值较稳定，相对稍富³⁴S，只是到了晚期呈现相对富³²S的趋势。根据H. Ohmoto和R. O. Rye^[10]意见，与含水花岗质熔体($\delta^{34}\text{S}_{xs}=0.0‰$)处于平衡的岩浆流体相的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{流体}}$ 值接近于4.0‰。而本矿床中未见到硫酸盐矿物，上述黄铁矿、辉钼矿和方铅矿是主要的硫化物，也就是说，成矿流体中的硫以还原形式硫组分占绝对优势。可以认为，这些硫化物矿物(27个)的平均 $\delta^{34}\text{S}$ 值(+4.8‰)，代表了与花岗质熔体处于平衡流体相的 $\delta^{34}\text{S}$ 值。因此，本矿床的硫可能是岩浆来源。

对本矿床云英岩和主矿化期含钼石英脉的4个石英样品和晚期的3个方解石样品的氧、碳同位素研究表明，石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值介于+8.4—+12.4‰；方解石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为+5.5—+11.4‰， $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为-3.8—-6.8‰。早期云英岩化(450℃)与石英平衡水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为+9.4‰，主要矿化阶段(400—300℃)与石英平衡水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为+2.6—+8.3‰，晚期(250—240℃)与方解石处于平衡状态水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为-1.6—+4.8‰。这说明成矿流体早期接近初生岩浆水($\delta^{18}\text{O}$ 值为+5.5—+10.0‰^[11])，演化到晚期为有大气降水参与的混合液，而主矿化期则以富岩浆水的混合热液为主。

四、矿床成因探讨

我们试图在宏观与微观研究的基础上，即以成矿地质条件为前提，结合有关同位素、流体包裹体等的研究，对金堆城斑岩钼矿床的成矿机制进行以下的分析探讨。

众所周知，世界上巨大型和大型斑岩钼矿床（又称细脉浸染型或网脉型钼矿床）均产于古老地台边缘与新的构造-岩浆活动带之间的过渡带内。如在北美地台西部边缘与科迪勒拉造山带之间，呈近南北向延绵数千公里之遥的狭长地带中，分布有世界上最著名的克莱梅克斯、亨德逊、埃蒙斯山、恩达科等钼矿床。我国中朝准地台北缘有杨家杖子，兰家沟等大型钼矿

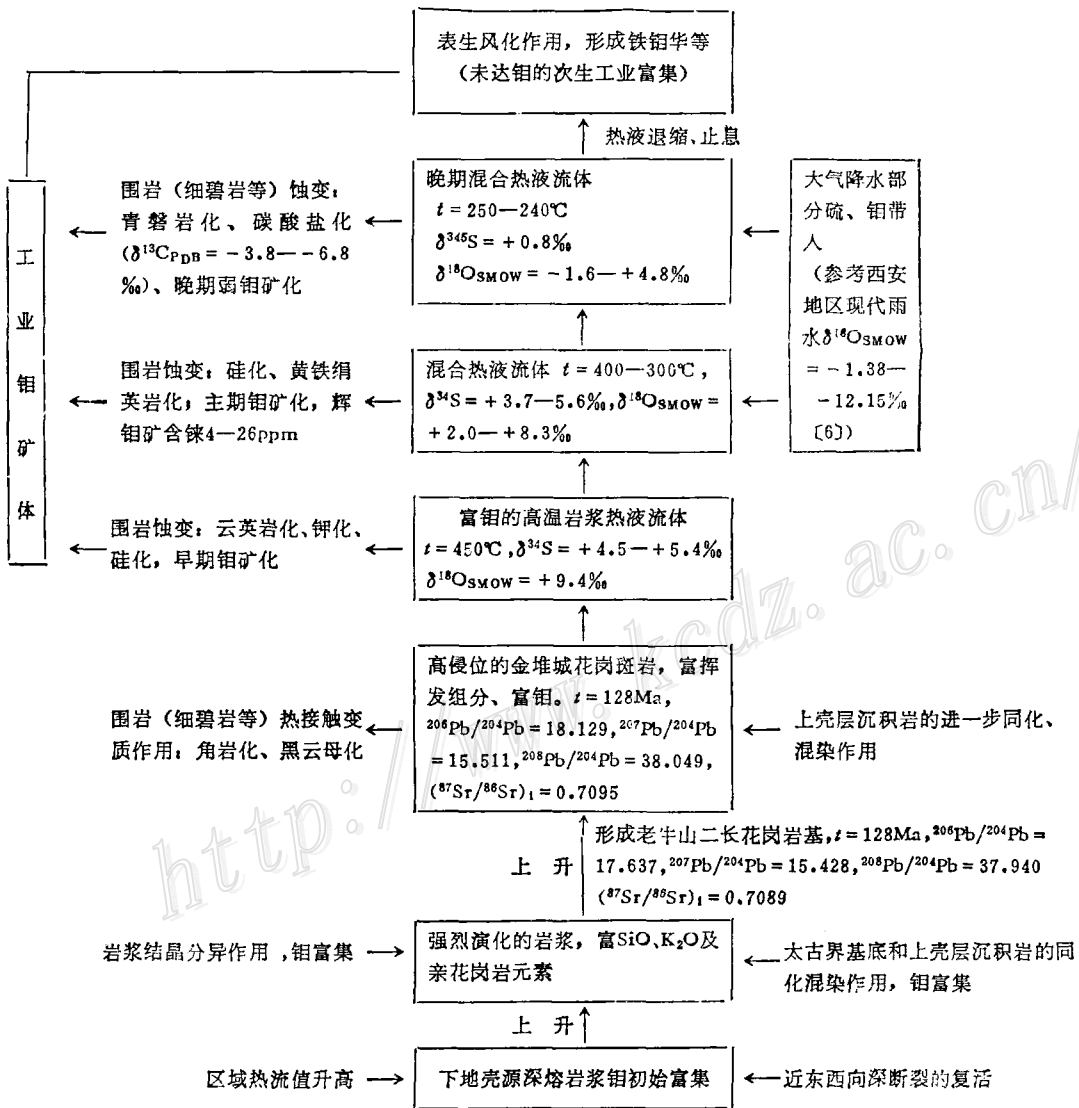


图4 金堆城斑岩钼矿床成矿机制模式图

Fig. 4 Metallogenetic model for the Jinduicheng porphyry molybdenum deposit.

床,其南缘有金堆城、南泥湖-三道庄、上房沟等巨型钼矿床。钼矿床的这种分布规律,究其原因,主要是在区域钼地球化学异常场的背景上,广泛的构造-岩浆活动导致源于下地壳深熔岩浆侵位-地球化学演化的结果。

金堆城地区的太古代太华群基底(即下地壳,含钼2—3 ppm),在燕山期因近东西向深断裂的复活和区域热流值升高,由基底岩石深熔作用产生了花岗质岩浆(初步富集钼)。该岩浆在上升过程中发生自身的结晶分异演化,并受太华群和熊耳群的同化混染,致使其富 SiO_2 、 K_2O 和亲花岗岩元素,并在断裂控制下侵入于太华群和熊耳群(含钼3—5 ppm)中,形成老牛山二长花岗岩基。由该岩浆进一步演化派生富含挥发分(H_2O 、 F 、 CO_2 等)和钼的高定位金堆城花岗斑岩,这可用蒸汽饱和的 $\text{K}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ 体系中 MoS_2 溶解度达12.5%^[12]的实验作为佐证。随着岩浆的冷凝固结,导致熔体和富水热流体的分离,正如I. D. Ryabchikov(1981)实验^[13]指出的,钼的流体/熔体分配系数高达11.5。这时便开始进入高温热液阶段。同时由于斑岩体热源造成的负压环境引起大气降水参与对流循环,使成矿热液系统具有混合液的特征。在此期间,由于岩石静压力和静水压力的更替,使岩石发生破裂和矿质脉动沉淀,便形成了纵横交错的含钼石英网脉。在由高温至中温变化过程中,伴随有钾化、绢(云)英岩化和强烈硅化。根据矿石的矿物共生组合(无硫酸盐矿物)和围岩蚀变的特点判断,在主要的石英-硫化物阶段,成矿过程处于一种低 f_{O_2} 、高 f_{S_2} 的弱酸性还原条件。而低-中等盐度成矿流体的沸腾是辉钼矿、黄铁矿等硫化物沉淀的根本原因。该斑岩热液系统进一步演化进入低温混合热液阶段,由于前期钼的大量沉淀,此时钼几乎耗尽,故在青磐岩化带仅见微弱的钼矿化。至此,该矿床的内生成矿作用宣告结束。其后进入表生作用阶段,虽无钼的次生富集,但所形成的铁钼华则是地表找矿的直接标志。本矿床的成矿机制模式如图4所示。本矿床的工业成因类型为斑岩型中高温热液钼矿床。

五、结 论

1. 中朝准地台边缘的古老地层中钼地球化学背景值大于克拉克值,而且中生代构造-岩浆活动较强烈,是形成钼矿床的有利地带,应是进一步寻找钼矿资源的优先选择地区。

2. 密切的时空关系、岩石学特征以及锶、铅同位素组成和稀土组成型式表明,老牛山二长花岗岩和金堆城花岗斑岩是深熔岩浆同源演化的产物。而呈被动高侵位的富挥发份和钼的花岗斑岩是形成本矿床的内因。

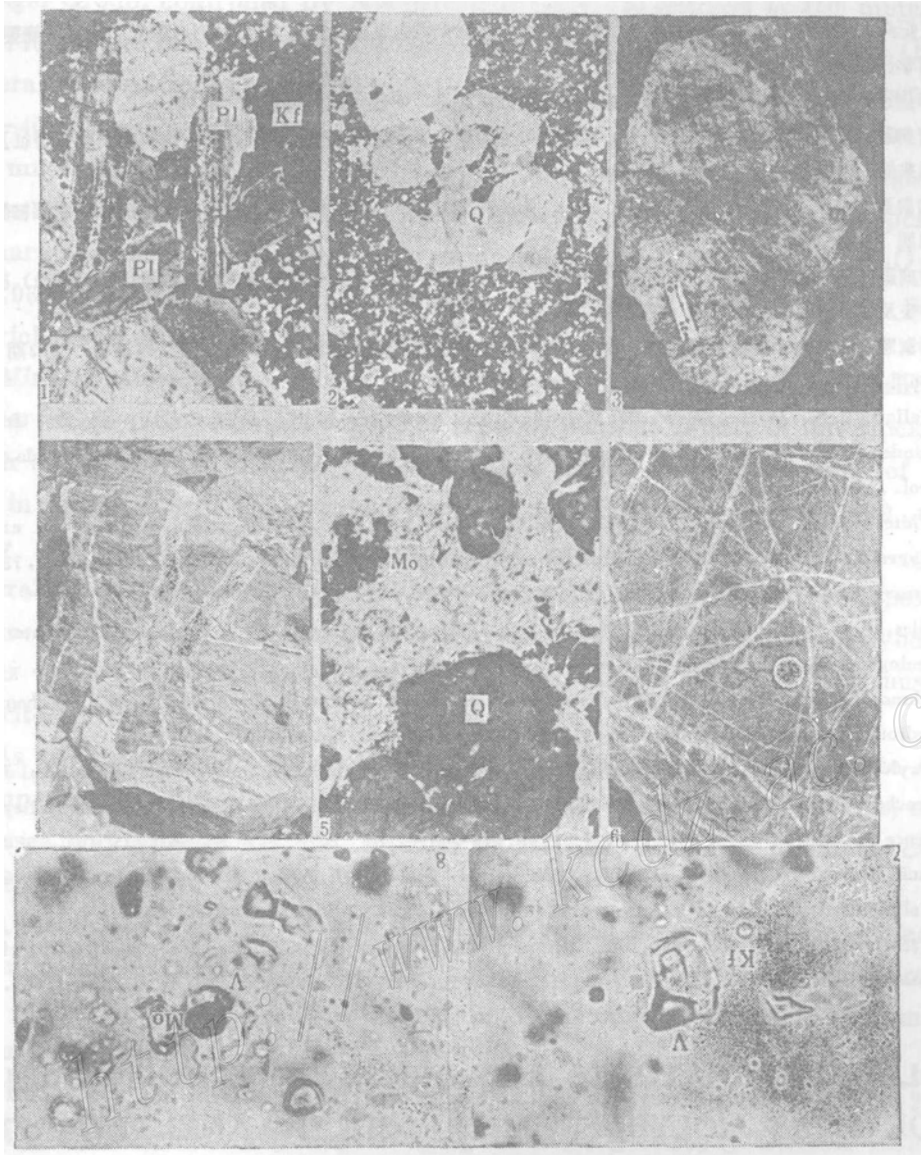
3. 该矿床钼的内生成矿作用经历了气成-热液、中高温热液和低温热液阶段,其中的中高温石英-硫化物阶段是钼富集成矿的主要阶段。与矿化关系最密切的热液蚀变为硅化,其次是绢(云)岩化和钾化。

4. 流体包裹体的研究表明,主要成矿温度为400—300℃;气体包裹体和含子矿物多相包裹体普遍共存。根据主要硫化物是黄铁矿、辉钼矿,伴有少量磁铁矿,而无硫酸盐矿物的特点判断,低 f_{O_2} 、高 f_{S_2} 的弱酸性还原条件,成矿流体的沸腾是 MoS_2 沉淀成矿的必要条件。

5. 硫、氧和碳同位素研究表明,高温阶段以岩浆水为主,高中温热液主要成矿阶段是以岩浆水为主的混合液,而晚期阶段是以大气降水为主的混合液。硫和钼主要是岩浆来源,少量萃取自围岩。

6. 本矿床的工业-成因类型为斑岩型中高温热液钼矿床。

本文蒙宋叔和教授审阅,并提了宝贵意见。在矿区工作期间得到金堆城钼业公司地质科刘照宽科长和李向东工程师的热情支持。阙松娇、程莱仙、周兴汉等同志帮助完成有关测试。王骁红和张琪同志帮助清绘有关图件。在此一并致以谢意。



照片说明

- 1 金堆城花岗斑岩 斑状结构,斜长石(Pl)和钾长石(kf)呈聚合斑晶 薄片J-14 正交偏光 ×20
- 2 金堆城花岗斑岩 六方断面石英(Q)斑晶被基质熔蚀呈港湾状,基质呈细-微粒花岗结构 薄片J-8 正交偏光 ×20
- 3 金堆城花岗斑岩体边部见到的条纹岩 由斑岩和其中密集平行分布的微细石英脉所组成 标本J-13
- 4 粗大而贫含辉钼矿的黄铁矿-石英脉和钾长石-石英脉 摄自金堆城钼矿1188露天采场
- 5 钼矿石中鳞片状辉钼矿(Mo)集合体交代石英(Q)呈残余结构 光片J82-5 ×200

- 6 多期次辉钼矿-石英细脉彼此交错形成的网脉构造 摄自金堆城钼矿1200露天采场
 7 含钾长石(kf)(?)子矿物多相包裹体 J-81-6 ×765
 8 含辉钼矿(Mo, 黑色六边形)子矿物多相包裹体 J81-1 ×765

参 考 文 献

- [1] 任纪舜、姜春发、张正坤、秦德余执笔 1980 中国大地构造及其演化(1:400万中国大地构造图简要说明) 科学出版社
- [2] 李应运 1959 某地辉钼矿床及其在北秦岭之找矿远景 地质学报 第33卷 第3期
- [3] 黄典豪、王义昌、聂风军、江秀杰 1984 黄龙铺碳酸岩脉型钼(铅)矿床的硫、碳和氧同位素特征及成矿物质来源 地质学报 第58卷 第3期
- [4] 黄典豪、聂风军、王义昌、江秀杰 1984 东秦岭地区钼矿床铅同位素组成特征及其成矿物质来源初探 矿床地质 第3卷 第4期
- [5] 黄典豪、王义昌、聂风军、江秀杰 1985 一种新的钼矿床类型——陕西黄龙铺碳酸岩脉型钼(铅)矿床地质特征及成矿机制 地质学报 第59卷 第3期
- [6] 郑淑蕙、侯发高、倪葆龄 1983 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究 科学通报 第28卷 第13期 801—806页
- [7] Wallace, S. R., Mackenzie, W. B., Hair, R. G. and Muncaster N. K., 1978, Geology of the Urad and Henderson molybdenite deposit, Clear Creek county, Colorado with these at Climax, Colorado. Econ. Geol., Vol. 73, pp. 325-368.
- [8] White, W. H., Bookstrom, A. A., Kamilk, R. J., Ganster, M. W., Smith, R. P., Ranta, D. E. and Steininger, R. C., 1981, Character and origin of Climax-Type Molybdenum Deposits. Econ. Geol., 75th Anniversary Volume, pp. 270-316.
- [9] Giles, D. L., Schilling, J. H., 1972, Variation in rhenium content of molybdenite. 24th International Geological Congress Section 10. Geochemistry. Montreal.
- [10] Ohmoto, H. and Rye, R. O., 1979, Isotopes of sulfur and carbon. in Barnes, H. L. ed., Geochemistry of hydrothermal ore deposits, New York, John Wiley and Sons, pp. 509-567.
- [11] Taylor, H. P., Jr., 1979, Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. Second Edition. Edited by Barnes, H. L., A Wiley-Interscience Publication John Wiley and Sons, pp. 244-248.
- [12] Isuk, E. E. and Carman, J. H., 1981, The system $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{Si}_2\text{O}_5\text{-MoS}_2\text{-H}_2\text{O}$ with implications for molybdenum transport in silicate melts. Econ. Geol., Vol. 76, No. 8, pp. 2222-2235.
- [13] Rychchikov, I. D. et al., 1981, Mobilization of molybdenum by fluids during the crystallization of granite melts. Geoch. Jnter. Vol. 18, No. 4, pp. 183-186. (Trans. from Geokhimiya, No. 8, pp. 1243-1246).

GEOLOGICAL FEATURES AND ORIGIN OF THE JINDUICHENG PORPHYRY MOLYBDENUM DEPOSIT, SHAANXI PROVINCE

Huang Dianhao, Wu Chengyu and Nie Fengjun

(Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing)

Abstract

Situated in the Yushaan faulted-upwarping area on the southern edge of

Sino-Korean Paraplatform, the Jinduicheng porphyry molybdenum deposit is the most important molybdenum mine being exploited on a large scale in China. During the Yanshanian orogeny there occurred tectono-magmatism, and the Jinduicheng granite porphyry was emplaced in metaspilite series of the Proterozoic Xionger Group, controlled by NW-trending fault. Its outcrop is 450 meters long and 150 meters wide, trending 330° and dipping laterally in NW direction (Fig. 1). Mineral compositions are mainly quartz (25—40%), microcline and microperthite (27—40%), and plagioclase (An 8—14, 14—32%), associated with minor biotite and muscovite, phenocryst is made up of K-feldspar, quartz and plagioclase. Accessory minerals are of magmatite-apatite-zircon assemblage. The porphyry is characterized petrochemically by an average SiO_2 of 73.83% and $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ of 8.06% (with $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratio being 1.82), belonging to silicon-high, potassium-rich rock of calc-alkaline series.

Mineralization occurs in the porphyry body and biotitized and hornfelsized spilite within the exocontact zone. The orebody consists chiefly of fine stockwork, which shows elliptic form in plan and has a length to width ratio of about four in cross section. The greatest depth of mineralization reaches 1000 meters below the surface (Fig. 3). According to assemblage of ore and gangue minerals, veins in the ore deposit have been classified into five types: (1) pyrite-quartz veins, (2) pyrite-K-feldspar-quartz veins, (3) pyrite-molybdenite-quartz veins, (4) pyrite-molybdenite-K-feldspar-quartz veins and (5) muscovite-fluorite-pyrite-molybdenite-quartz veins.

As the most important economic molybdenum mineral, molybdenite occurs in impregnation, radioflake, thin film and veinlet forms in the veins, mainly possesses polytypes of 2H and mixture of 2H+3R, and has rhenium content ranging from 4.2 to 26ppm.

Alterations of the wall rocks show grossly zonation of K-feldspathization-greisenization→silicification→propylitization from the porphyry outwards; of these alterations, silicification is intense and has close relationship with molybdenum mineralization.

Fluid inclusion studies yield homogeneous temperatures from 250°C to 240°C , with the main ore-forming stage ranging from 400°C to 300°C . Gaseous inclusions are frequently coexistent with multiphase inclusions containing such daughter minerals as halite, sylvite, molybdenite and K-feldspar. Under the condition of medium-high temperature, lower f_{O_2} , high f_{S} , and weak acidity, the boiling of ore-forming fluids makes up a prerequisite for the precipitation of molybdenite.

Isotope compositions of sulfur, oxygen and carbon suggest that the high temperature stage (450°C) mainly has magmatic water ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = +9.4\%$),

$\delta^{34}\text{S} = +4.5 - +5.4\%$), and the main ore-forming stage ($400-300^\circ\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = +8.3 - +2.0\%$, $\delta^{34}\text{S} = +5.6 - +3.7\%$) is characterized by mixture solution with magmatic water as the major source. In contrast, the late stage is noted for mixed solution dominated by meteoric water ($250-240^\circ\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = +4.8 - -1.6\%$). It is therefore conceivable that sulfur and molybdenum are mostly derived from magmatic source.

In conclusion, the industrial-genetic type of the studied deposit belongs to porphyry type medium-high temperature hydrothermal molybdenum deposit whose metallogenetic model is outlined in Fig. 4.

书刊介绍

《层控与层状矿床手册》第十三卷

Handbook of Strata-bound and Stratiform Ore Deposits Volume 13

由 K.H. 伍尔夫主编的《层控与层状矿床手册》全书共13卷, 迄今已全部出齐。第十三卷为该套手册的最后一卷, 着重于区域性研究及某些专门的矿床。内容计有五章。

第一章: 与煤共生的金属矿石, 由 P. 拉兹尼卡(加)编写。作者详细探讨了在不同煤岩类型中与之有关的金属元素组合分布情况。作者详述了世界各地具代表性的不同成因的煤层中的金属元素的分布情况, 如泥炭、褐煤、烟煤及无烟煤中 U、Ge、Ga、Be、As、Hg、Cu、Pb、Zn、W、Sn、Mo、Ni、Re、Sb、V、Ag、Ti 以及 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO_2 等含量分布, 并特别指出它们在原生沉积、不同相带中的分布及后生变质、岩浆、热液对它们的改造富集作用。

第二章: 条带状含铁建造中由表生及表生-变质作用形成的铁矿床的成因概念模式, 作者为 R. C. 英理斯(澳)。通常条带状含铁建造均为贫铁矿石, 但由于后期改造富集作用, 局部可形成 Fe 品位超过 65% 的富铁矿石。作者介绍了三种主要模式, 即: 同生沉积成岩模式; 表生氧化淋滤模式; 后生变质热液及岩浆活化改造模式。并详细介绍了西澳的哈默斯莱富铁矿的形成机制, 列举了大量表生富集矿石光片照相, 扫描电镜图象; 也详细介绍了变质热液去硅富铁的形成机制。

第三章: 产于沉积岩主岩中铜矿床的矿物分带, 由 E. 李勃赖(美)编写。作者应用矿物相平衡及物理化学图解说明不同沉积相带的硫化铜铁矿物的矿物组合分带特点, 并对产于沉积岩主岩中铜硫化物分带顺序及其演化作了分析。

第四章: 铁帽, 作者为 E. H. 涅克尔(澳)及 J. L. 丹尼尔斯(澳)。这一章详细分析了铁帽形成的地质、物理化学条件; 阐述了铁帽形成的电化机理; 描述了氧化铁, 氧化锰, 硅铝酸盐, 铜、铅、锌、镍、钴、银等的硫化物、金以及脉石矿物在表生作用中的变化。并用多幅图片详细描述了铁帽的矿物组成和结构构造特征; 列举了各种元素的活动性对铁帽的评价意义, 以及铁帽研究的内容与方法等。内容丰富, 图象精彩。

第五章: 密西西比河谷矿床形成中作为一种重要因素的热液喀斯特化现象。作者为波兰的 S. 佐林斯基等。这一章对地下水溶液的溶解侵蚀作用、溶解坍塌角砾岩的形成、岩溶洞穴内的矿物形成与矿石结构构造特点, 硫化物的胶状构造及与交代作用、裂隙充填作用的关系, 以及对相反意见的评论等都有较好的说明。本章结合了波兰西里西亚铅锌矿床实际, 材料具体, 图文并茂。

(中南工业大学卧石供稿)