

铜陵天马山金硫矿床成矿系统研究

王银宏

(中国地质大学, 北京 100083)

摘 要: 天马山金硫矿床位于铜官山背斜近倾没端、靠近轴部的东南翼, 天鹅抱蛋山岩体东侧。文章从成矿系统的角度对区内多金属矿床进行了阐述: 矿区成矿系统要素, 如矿源场、成矿流体、成矿能量和储矿场; 成矿流体在流体输运-化学反应耦合成矿作用过程中, 与成矿流体组分相关的成分守恒方程; 在特定的时空条件下, 矿区矿源场、流体场和能量场的耦合过程; 成矿作用机理。

关键词: 成矿系统; 天马山金硫矿床; 铜陵

中图分类号: P612; P618.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2005)02-0106-05

成矿系统是指在一定的时空域中, 控制矿床形成、变化和保存的全部地质要素和成矿作用动力过程, 以及所形成的矿床系列、矿化异常系列构成的整体, 是具有成矿功能的一个自然系统^[1]。

铜陵地区是长江中下游成矿带中的重要聚矿区。铜官山矿田是铜陵地区四大矿田之一, 由铜官山铜矿床、天马山金硫矿床和金口岭铜金矿床组成。其中, “天马”一词是取天鹅抱蛋山和马山两个矿段的首字而得名。该矿床位于铜官山背斜近倾没端、靠近轴部的东南翼, 天鹅抱蛋岩体东侧。矿区地表仅出露二叠系, 向下依次为上石炭统和上泥盆统。主要赋矿层位为黄龙组(C_2h), 其次为船山组(C_3c)和栖霞组(P_1q)底部^[2,6]。本文在前人研究的基础上, 拟对区内矿床进行成矿系统要素和成矿作用过程分析, 以期对区内进一步勘探找矿提供相应的科学依据。

1 矿床地质

1.1 矿体特征

天马山金硫矿床的含矿带长达 1 400 m, 平均厚 15 m 左右, 延深 1 200 m, 主要沿黄龙组白云岩段(下段)与纯灰岩段(上段)之间, 以及船山组灰岩与栖霞组灰岩, 黄龙组与船山组, 黄龙组与上泥盆统五通组之间的层间裂隙带发育^[3,6], 均为隐伏矿体。

矿体产状稳定, 形态简单, 呈似层状、透镜状和脉状, 有分支-复合, 膨大-缩小, 尖灭-再现的现象。矿体内部见有大理岩角砾, 硫化物矿脉常斜切围岩层理, 表明矿体受构造控制(周真, 1984)。矿体沿倾向斜断续分布在 3 个不同深度范围内: 即 - 100 ~ - 300 m, - 400 ~ - 500 m, - 850 m 左右。在硫化物矿体的内部、顶部或底部多赋存有金矿体(图 2)。

1.2 矿石类型和组构特征

矿石成分较复杂, 金属矿物和脉石矿物多达 60 余种。金属矿物有磁黄铁矿、黄铁矿、自然金、毒砂、胶状黄铁矿、闪锌矿、磁铁矿、黄铜矿、方铅矿等; 脉石矿物有石英、方解石、白云石、蛇纹石、滑石、绿泥石、石榴子石、白云母、红柱石、十字石等。据物相分析, 矿石矿物以磁黄铁矿为主, 占 41.5%, 各矿物在空间上呈不均匀分布^[6]。矿石中主要的化学组分有金、硫、砷, 次要组分有银、铜、锌、铁、铅等^[7,8]。

矿石组构可划分为沉积成岩组构、沉积-热变质组构和热液叠加组构, 由于受改造的影响, 以后两种组构为主^[6]。矿石的结构主要有热液叠加作用形成的自形-半自形晶结构, 磁黄铁矿交代黄铁矿形成的交代残余结构, 以及沉积胶状黄铁矿-黄铁矿的重结晶三联嵌生结构, 此外, 还有压碎结构、边缘结构、乳浊状结构等。

矿石类型有块状硫化物和浸染状硫化物矿石两类, 以前者为主, 占 75%^[3,6]。

收稿日期: 2004-05-26

基金项目: 国家 973 项目(N01.G1999043215)和中美矿产资源评价合作研究项目联合资助。

作者简介: 王银宏(1973-), 男, 博士生, 研究方向区域成矿学及计算机科学应用。

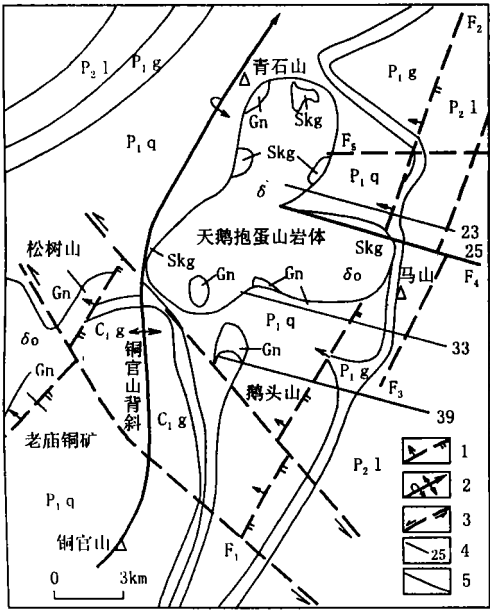


图 1 天马山金硫矿床地质图
(据 812 地质队修编)

Fig. 1 The geological map of Tianmashan
Gold & Sulfur deposit

P₂l. 龙潭组 P₁g. 孤峰组 P₁q. 栖霞组 C₂₊₃. 黄龙、船山组
C₁g. 高骊山组 D₃w. 五通组 δ. 闪长岩 δ_o. 石英闪长岩
Skg. 石榴子石夕卡岩 Skd. 透辉石夕卡岩 Gn. 铁帽 F. 断层

2 成矿系统要素分析

2.1 矿源场

成矿物质是成矿系统中的物质基础, 包括金属元素、非金属元素、有机质和它们的化合物^[1]。矿区主要含矿地层中 Au 的质量分数均很低(表 1), 且与其对应的区域地层中 Au 的质量分数也较低。如矿区地层黄龙组(C₂h)中 w(Au) 平均值只有 2.6 × 10⁻⁹ ~ 2.8 × 10⁻⁹, 低于地壳中 Au 的平均丰度(4 × 10⁻⁹), 与区域地层中相同层位 w(Au) 平均值基本一致。但它仅为闪长岩类平均值的 1/4 左右, 天马山金硫矿床矿石平均品位的 1/2000~ 1/3000^[3]。据季克俭研究, 与成矿作用密切相关的天鹅抱蛋山岩体, 岩石类型有石英闪长岩→花岗闪长岩→微文象花岗岩, w(Au) 依次为 95 × 10⁻⁹ → 78 × 10⁻⁹ → 63 × 10⁻⁹, 表明在岩浆由石英闪长岩向花岗闪长岩的演化过程中, 有(95- 78)/95 × 100% = 18% 的金从岩浆中析出。如果假设原始岩浆房中 w(Au) = 95 × 10⁻⁹, 随着岩浆的演化有 18% 的金从岩浆中析出, 岩

浆房体积取 3 km³, 密度取 2.6 g/cm³, 则有 54.4 t 金转入岩浆热液, 这说明形成天鹅抱蛋山岩体的岩浆有足够的金供给天马山金硫矿床。这表明, 区内成矿物质金主要来源于岩浆, 与其所在的地层没有直接的成因联系。

表 1 天马山主要含矿地层中金的质量分数
Table 1 Gold contents in the main ore-bearing
strata of Tianmashan deposit w_B/10⁻⁹

采样部位	区域地层		矿区地层		备注
	样品数	Au	样品数	Au	
孤峰组(P ₁ g)	2	3.0	1	6.5	
	4	3.1	13	5.1	
栖霞组(P ₁ q)	-	-	15	2.2	
	1	1.5	6	1.9	
船山组(C ₂ c)	-	-	5	< 2	
	2	3.5	14	2.6	
黄龙组(C ₂ h)	-	-	6	2.8	
	-	-	91	9.8	
闪长岩类	-	-			
地壳 Au 平均丰度		4.0			

资料来源: 、 、 、 据周泰禧; 、 、 、 据周真; 据 Wedepoh。

硫的来源前人已有较多的论述, 据周真测得矿区中矿体、岩体、地层硫同位素的变化范围 δ(³⁴S) 分别为 4.56 × 10⁻³ ~ 10.4 × 10⁻³, 3.41 × 10⁻³ ~ 8.7 × 10⁻³, - 13 × 10⁻³ ~ - 35.4 × 10⁻³; δ(³⁴S) 平均值分别为 6.39 × 10⁻³, 5.11 × 10⁻³, - 27.3 × 10⁻³; ³²S/³⁴S 分别为 22.08, 22.11, 22.8。不难看出, 岩体和矿体的 δ(³⁴S) 平均值非常相近, 变化区间较窄, 显示二者为同源关系, 都来自地壳深部的岩浆或幔源。地层中的 δ(³⁴S) 皆为负值则反映了外生条件下生物细菌作用的结果。

2.2 成矿流体

指各类地质流体经过一定的地质演化而演变为包含和搬运成矿物质的那一部分流体, 包括来源于大气降水、地层水、岩浆水、变质水和幔源的流体等, 是成矿系统中最为活跃的因素^[1]。它能够萃取、溶解、搬运、沉淀和聚集区内金、硫等成矿物质, 并形成沟通矿源场、运移场和储矿场的纽带和媒介。

矿区成矿流体在流体输运-化学反应耦合成矿作用过程中, 经历了夕卡岩阶段、氧化物阶段、硫化物阶段和碳酸盐阶段, 其中氧化物阶段和硫化物阶段为主要的成矿阶段^[9]。在成矿作用过程的每一个

阶段,成矿流体组分发生相应的变化,但它们仍符合成分守恒方程^[5,6]:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + u \cdot \nabla\right)c = D \nabla^2 c$$

方程中: t 是时间; u 是速度; c 是二元岩浆中轻组分的浓度; D 是轻组分的物质扩散系数。

(1) 在氧化物阶段,温压较夕卡岩阶段有所降低,成矿流体从超临界状态转入溶液状态,并有少量地下水热液加入。含矿热液与早期的夕卡岩及白云岩围岩反应,使得流体的 pH 值升高,氧逸度降低, K^+ , Na^+ 浓度增加,并且其质量分数达到最大值^[9]。这样,成矿流体温压和氧逸度的下降及其金属离子浓度的上升,使得 Fe 的络合物和卤化物发生分解而生成磁铁矿。同时,由于此时成矿流体处于较高温度和偏碱环境,因此金的络合物仍相当稳定,不会快速大量沉淀析出。

(2) 在硫化物阶段,金主要以 $[Au(HS)]^{2-}$ 和 $[AuS]^-$ 存在,含矿热液与白云岩围岩及其中的含有机质含金胶黄铁矿层继续相互作用,使成矿流体中的 Au, Fe^{2+} 和 ΣS^{2-} 浓度增加,氧逸度和 pH 持续下降。同时,地下水热液不断加入到成矿流体中,形成强烈的热液混合作用,使成矿流体发生沸腾,导致络合物开始大量分解。它们与溶液中的 Fe^{2+} , Zn^{2+} 和 Pb^{2+} 反应,使金大量还原析出,形成磁黄铁矿、银金矿,以及少量黄铜矿、闪锌矿等^[6],结果使成矿流体中的 S^{2-} 减少, F^- 和 Cl^- 增加。最后,随着温度的进一步降低和 S^{2-} 的持续减少,热液中的 Au, Te 和 Bi 等呈自然元素矿物(如自然金和自然铋等)沿磁铁矿、黄铁矿、毒砂和黄铜矿的晶隙及裂隙结晶沉淀成矿^[9]。该阶段产生多种矿物,从而也是区内矿物成分复杂多样的重要原因。

2.3 成矿能量

天马山矿床主成矿阶段的温度在 325~475℃ 之间^[3],压力在 55~20 MPa 之间^[9]。矿区温压的形成主要是由于岩浆侵入后形成一个以岩体为中心的温度梯度带和压力梯度带,温度梯度带和压力梯度带的存在对于流体萃取、运移、流体输运过程中的水-岩反应(即系统与环境的耗散作用等)以及流体中有用物质的沉淀堆积起着至关重要的作用。它们一方面使流体发生运移并将成矿物质输运到聚矿场所,另一方面使矿物的溶解度和溶液内化学物种的热力学性质发生改变。在铁硫化物形成的最初时期,温度高于 400℃,热液中的 H_2S 主要以未离解的中性分子状态存在,而 S^{2-} 和 S_2^{2-} 浓度相对很低,所以,当

其与溶液中 Fe^{2+} 结合沉淀时,有利于形成粗大的单硫(S^{2-})和对硫(S_2^{2-})的铁矿物。随着温度降低(<400℃)时,氧化程度也有所降低,溶液中对硫(S_2^{2-})逐渐增高,并居主导地位,于是,形成了大量的对硫矿物(黄铁矿),由于其晶出迅速,结晶颗粒小,到毒砂出现时,溶液中的对硫(S_2^{2-})已相对减少,故出现了硫砷对(AsS^{2-})与 Fe^{2+} 结合而沉淀^[3,4]。

2.4 储矿场

铜官山背斜由铜官山至青石山,其轴线呈 S 型,即由南部的 NE 向至铜官山一天鹅抱蛋山呈近 SN 向,然后至青石山转向 NNE,其转折部位 NW 向左行平移断层发育(图 1)。在铜官山褶皱晚期,背斜东南翼发育一组 NNE 向断层(F_1 和 F_2)^[3,6]。在天鹅抱蛋山至马山一带,不同岩性岩层之间,受背斜轴向偏转及东南翼倒转的联合作用,形成了发育的层间断裂破碎(剥离)带,岩浆侵入巨厚的五通组砂岩后,沿着这些断层和岩层间裂隙充填耦合成矿,构成本矿床重要的聚矿场所。

3 成矿作用机理

3.1 热传导和流体流动定理

天马山金硫矿床的形成是在特定的地层岩性、岩浆活动和构造运动的条件下,成矿流体输运-化学反应耦合的产物。其中岩浆侵入引起的热异常及热致流体输运的动力学分析会应用到热传导方程、流体连续性方程和流体反应耦合过程偏微分方程^[5,6]:

(1) 热传导方程:如不考虑由于化学反应和放射性衰变产生和消耗的热,则有:

$$\rho_m c_{p,m} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_m \nabla T - \rho c_{p,f} UT)$$

式中: λ_m 是块体介质的热导率; T 为温度; U 为达西速度; ρ_m 和 ρ 分别为块体介质和流体的密度; $c_{p,m}$ 和 $c_{p,f}$ 为块体介质和流体的定压比热容。

(2) 流体连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho \varphi)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho U)$$

如果忽略矿物水解反应,并将流体看作不可压缩的,地质体系中的空隙度(φ)变化很小,则可将上式简化为: $\nabla \cdot U = 0$ 。

(3) 流体-反应耦合过程偏微分方程:

$$\frac{\partial(\varphi c_{j,tot} \rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (U c_{j,tot} - D \nabla c_{j,tot}) = R_{min,e,j}^{tot}$$

($j = 1, 2, \dots, N_c$)

式中: $U = \Phi u$; $R_{min, j}^{tot}$ 为溶解和沉淀(非均质)总反应速度; u 为真流动速度; D 为扩散速度。

3.2 成矿作用过程机理

天马山矿床是在早期含有机质的含金胶状黄铁矿矿源层的基础上, 经夕卡岩阶段、氧化物阶段、硫化物阶段和碳酸盐阶段热液叠加改造形成的^[9]。整个成矿作用过程为: 矿质供应 → 流体运移 → 聚集定位。

首先, 矿区岩浆侵入后形成以岩体为中心的温度梯度带, 即上侵岩浆逐渐失去下部更大岩浆房的热源供给, 并于围岩之间发生热输运。它驱动原生流体流动, 将热输送到更远处, 与围岩交换后, 再返回岩体。这一过程一直延续到岩体温度与围岩初始温度平衡为止^[6, 10]。同时, 矿物溶解度和溶液相化学物种的热力学性质在不同温度条件下差异明显, 金-硫化物在高温下具有较高的溶解度, 即高温热流体中可以含有较高浓度的金-硫化物而不沉淀, 这种流体沿温度梯度带流动时, 将导致固相金-硫化物沉淀。

其次, 成矿流体的流速可以促进混合热液的形成, 岩层裂隙带成为强烈输运-反应耦合成矿的有利场所^[10]。据於崇文等对矿区流体流动动力学模拟研究^[6]表明, 流动中心主要发生在砂岩与白云岩区域, 灰岩区流速极其缓慢。其说明上覆在砂岩之上的灰

岩对流体的流动具有隔挡作用, 流体从砂岩地带向白云岩区流动进入白云岩或砂岩与碳酸盐岩界面后, 遇到灰岩即折返向岩体方向流动。正是这一特殊的流动方式导致溶解于流体中的金和金属硫化物随着流体流动, 在截面处发生反应而沉淀, 形成溶解-沉淀反应前锋。随着流体循环流动, 反应前锋不断扩展, 沉淀的矿层逐渐加厚。如此循环往复, 流体逐渐将深部及围岩中低浓度星点状的金及金属硫化物输运到截面而沉淀成矿^[10]。

最后, 多因耦合、多参数临界转换成矿。耦合是指成矿作用涉及地质的、化学的、物理的、生物的诸多因素间的相互作用和彼此影响。多种有利控矿因素在一定时空域中耦合是成矿作用发生的重要条件^[11]。正如上述成矿流体要素中分析, 在成矿过程的每一个阶段, 矿区构造环境、温度、压力、深度、 f (O_2) 等参数都发生重要的转变, 其使成矿过程从一个阶段转向另一个阶段, 并最终聚集成矿。其成矿系统模式如图 2 所示。

4 总结

本文在前人大量研究基础上, 基于成矿系统的角度分析了区内多金属矿床的矿源场、成矿流体、成矿能量和储矿场等成矿系统诸要素; 定性地研究了

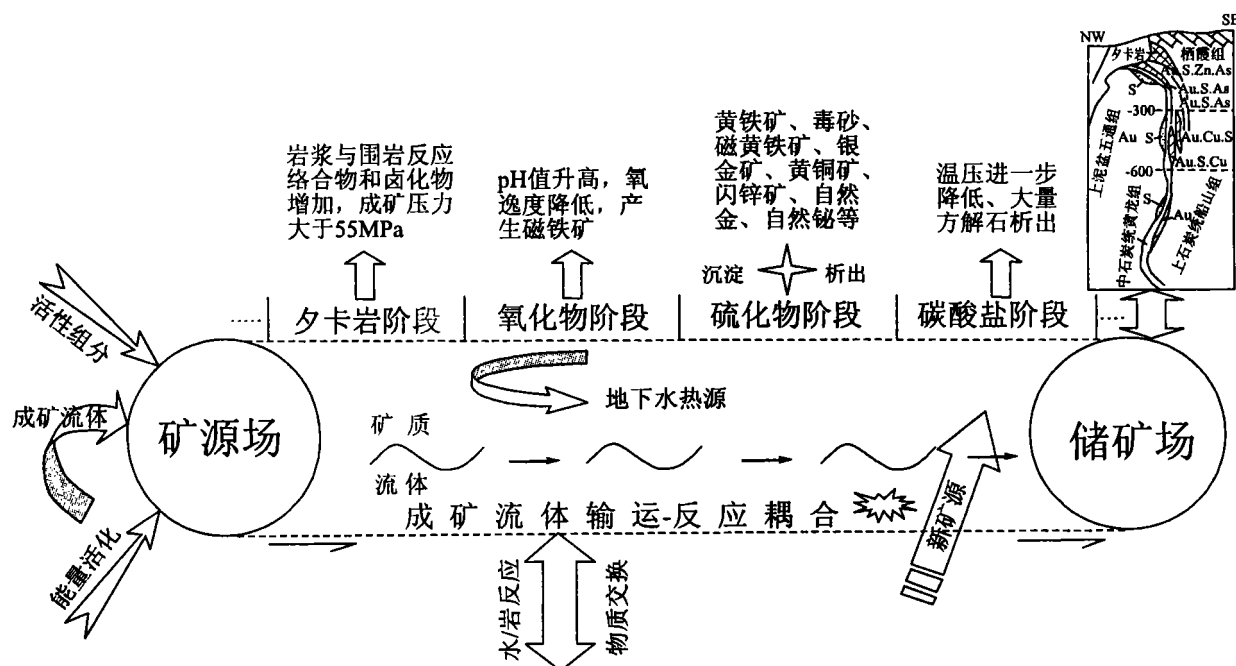


图 2 铜陵天马山金硫矿床成矿系统模式示意图

Fig. 2 The sketch map of metallogenic system of Tianmashan Gold-Sulfur deposit in Tongling

区内成矿流体在流体输运-化学反应耦合的成矿作用过程,探讨了成矿作用过程机理,并提出了相应的成矿模式。最后,要从四维空间进一步定量地研究区内成矿作用过程,仍需做更进一步的研究工作。

参考文献:

[1] 翟裕生, 邓军, 李晓波. 区域成矿学[M]. 北京: 地质出版社, 1999.

[2] 张达, 吴淦国, 李东旭. 铜陵凤凰山岩体接触带构造变形特征[J]. 地学前缘, 2001, 8(3): 223-229.

[3] 唐永成, 吴言昌, 储国正, 等. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1998.

[4] 周真. 铜陵马山金矿床成因的研究[J]. 地质论评, 1984, 30(5):

467-475.

[5] 於崇文, 岑况, 鲍征宇, 等. 热液成矿作用动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.

[6] 於崇文, 岑况, 鲍征宇, 等. 成矿作用动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1998.

[7] 吕俊武, 夏元法. 天马山硫金矿床金的赋存状态及分布规律[J]. 地质与勘探, 37(3): 29-31.

[8] 刘文灿, 高德臻, 储国正. 安徽铜陵地区构造变形分析及成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 1996.

[9] 杜杨松, 田世洪, 李学军. 安徽铜陵天马山矿床与大团山矿床流体成矿作用对比研究[J]. 地球科学, 2000, 25(4): 433-437.

[10] 邓军, 翟裕生, 杨立强, 等. 剪切带构造-流体-成矿系统动力学模拟[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 115-127.

[11] 翟裕生, 吕古贤. 构造动力体制转换与成矿作用[J]. 地球学报, 2002, 23(2): 97-102.

A STUDY ON THE METALLOGENIC SYSTEM OF TIANMASHAN
GOLD-SULFUR DEPOSIT IN TONGLING

WANG Yin-hong

(China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Tianmashan Gold-sulfur deposit is located nearly to the pitching end of Tongguanshan anticline, southeast side of its axis, and east of the Tian'e baodanshan intrusion. Based on the former research, authors depend on metallogenic system theory to study this polymetallic deposit. the system includes: factors, such as the ore-source field, the ore-forming fluid, the ore-forming energy, and the ore storing field, the component conservation equation relative to the ore-forming fluid components during the coupled ore-forming processes of fluid transport-chemical reactions, the coupled processes of the ore source field, fluid field, and energy field under the spacial time-space condition, and the ore-forming mechanism.

Key words: Metallogenic system; Tianmashan Gold-Sulfur deposit; Tongling city

• 来函照登 •

作 者 声 明

本人发表在《地质找矿论丛》2005 年第 1 期的文章《塔河油田奥陶系油田水特征离子及意义》, 由于未与第二作者沟通, 第二作者事先并不知情, 文章责任由第一作者负责。特此声明。

刘建伟
2005 年 5 月 16 日