

## 滇中砂岩铜矿成矿机理的再认识

郭学兵<sup>1</sup>, 刘 星<sup>2</sup>, 薛传东<sup>2</sup>

(1. 云南楚雄矿冶股份有限公司, 云南 大姚市 675401;

2. 昆明理工大学地球化学系, 云南 昆明 650093)

**摘 要:**滇中砂岩铜矿床形成于白垩系高峰寺组和马头山组中, 矿体呈似层状、透镜状, 受层位控制矿石构造以浸染状、条纹状为主, 并见矿化受泄水构造和准同生变形构造控制, 在郝家河矿中有脉状矿体产出。矿体多见于背斜缓倾斜翼。矿化分带明显, 这种分带形成于浅紫交互部位。硫、铅同位素和稀土资料研究显示, 铜来自围岩, 硫为细菌还原硫, 主要来自下部层位, 在成岩期间来自上部的氧化含铜卤水和来自下部的还原卤水, 在应力中和面反应形成矿体。

**关键词:**滇中; 白垩系; 砂岩铜矿; 成矿机理

### 1 矿床地质特征

#### 1.1 成矿区地质概况

滇中砂岩铜矿是我国重要的砂岩铜矿成矿区, 区内形成了六苴、郝家河、大村、团山、凹地苴、格衣乍等6个中型铜矿床和10余个小型矿床(见图1)。成矿区位于扬子古地台西南缘的楚雄盆地中, 盆地自晚三叠世开始发育, 至始新世结束。在盆地发育的不同阶段分别形成了黑色含煤建造、红色含铜砂岩建造和白色膏盐建造, 简称“三色建造”。盆地内南北向正断层发育, 并控制着盆地内次级凹陷的分布, 在元谋一带形成古陆隆起。区内重要的铜矿床均沿元谋古陆西部边缘分布。区内主要发育两套地层, 一是分布于元谋古陆及盆地边缘的晚元古代地层, 二是不整合在基底地层之上的中生代地层, 在成矿区内较常见的地层主要是中生代的红色砂岩。从下到上依次为下侏罗统的冯家河组、中侏罗统的张河组、上侏罗统的蛇店组、妥店组、下白垩统的高峰寺组、普昌河组、上白垩统的马头山组六苴段和大村段。主要成矿作用发生在高峰寺组凹地苴段、马头山组六苴段和大村段。滇中砂岩铜矿形成于两种古地理环境: 河流相和三角洲相, 并分别形成狭义的砂岩铜矿和页岩铜矿。前者包括产在六苴段的六苴矿床、郝家河矿床、格衣乍矿床和产于凹地苴段的凹地苴矿床。后者包括产于大村段的大村铜矿和团山铜矿。

#### 1.2 矿体的产出规律

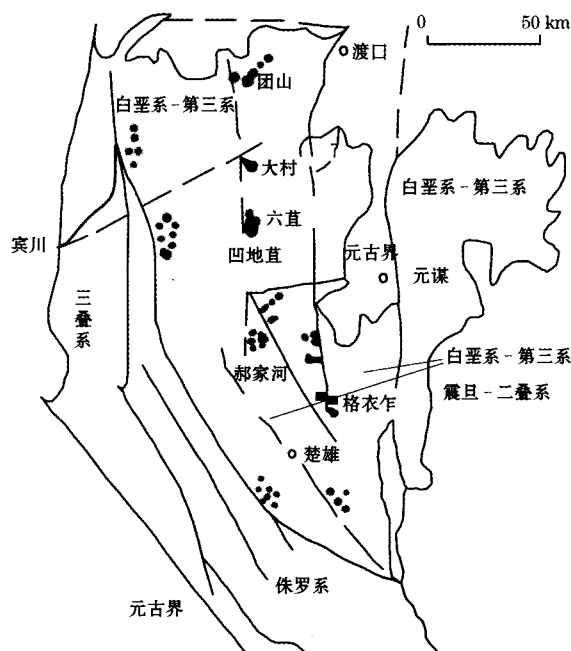


图1 楚雄盆地砂岩铜矿分布

#### 1.2.1 矿体在沉积剖面上的位置

不论是形成于河流相还是三角洲相, 其容矿岩石都具有向上变细的结构, 这种结构常形成于不整合面之上, 其下为砾岩或粗砂岩, 向上变为细砂岩, 顶部为粉砂岩、泥质岩或钙质泥岩。矿体常形成于砾岩上部的中细砂岩中。在页岩型铜矿(如大村、团山)中, 由于岩层较薄, 矿化层位于砾岩和页岩过渡部位。在六苴铜矿约79%的矿化产在中细粒砂岩中, 只有约16%和5%的矿化形成于砾岩和粉砂

质页岩中。大村铜矿也类似,砂岩占含矿层厚度的52.5%,页岩和砾岩分别占42.8%与5.2%。说明溶液并不是沿透水性好的不整合面及砾岩带流动,矿化的这种分布可能代表地层在成岩期间孔隙水排出向上运动的结果。

### 1.2.2 矿体与褶皱构造的关系

砂岩铜矿大都与褶皱构造关系密切,统计表明,61%的矿床与背斜有关,39%的矿床与向斜有关,其中六苴、郝家河、凹地苴等矿床均受褶皱控制,主矿体形成于背斜缓倾斜一翼,在陡倾斜一翼矿化较差。

### 1.2.3 矿体的形态

砂岩型矿床矿体呈似层状、透镜状,受层位控制,产于古河道中。走向长度从几十米到几千米,宽

几十米,厚度几米到几十米不等。六苴矿床矿体在剖面上西端呈“鱼头”或楔形尖灭于紫色砂岩中,东端矿体呈“燕尾”分支尖灭于浅色砂岩中,代表了一种溶液向下运动的古水文状态。桂花大村页岩铜矿床呈薄层状,厚0.59 m左右,面积9.4 km<sup>2</sup>,宽1~2 km、铜平均品位1.80%。具矿层薄、品位富、成层稳定的特点。

### 1.3 矿物组成及矿物分带

滇中砂岩铜矿主要金属矿物包括辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿、黄铁矿、赤铁矿,这些矿物不论是在平面上还是在剖面上,都表现出从紫色层向浅色层有规律地分带:赤铁矿—辉铜矿—斑铜矿—黄铜矿—黄铁矿。这种分带具有两种表现形式(见图2)。

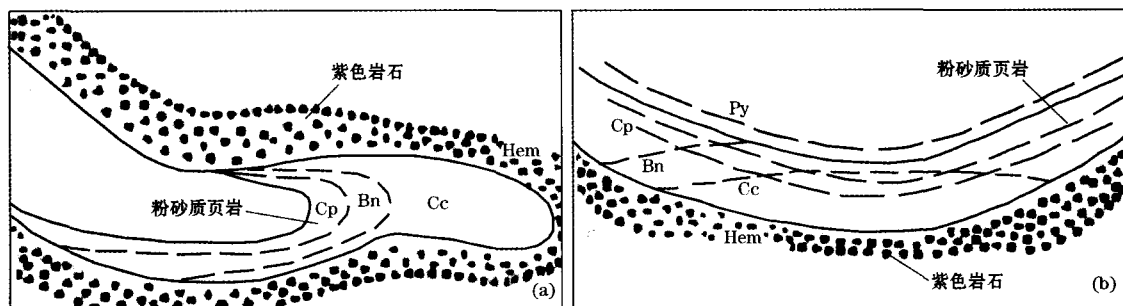


图2 滇中砂岩铜矿两种矿物分带形式

(a)六苴小河~石门坎矿段29°剖面,代表矿物的沿层分带 (b)大村铜矿112°剖面,代表矿物的垂直分带

Py—黄铁矿 Cp—黄铜矿 Bn—斑铜矿 Cc—辉铜矿 Hem—赤铁矿

沿层分带形成于主要受河道控制的砂岩型铜矿中,这种分带在成矿区占绝大多数,以六苴矿床最为典型。郝家河矿床分带不明显,但局部仍可以分出这样的分带。凹地苴矿床的分带较复杂,但可用这种分带相互叠加来解释,如凹地苴矿床南部井田208剖面,至少出现3次这样的叠加。垂直分带产于三角洲相的页岩型铜矿内,以大村铜矿为代表。如果说表征富集形成的分带(从上到下为铜氧含量的减少,铁硫含量的增加)代表了氧化的含铜溶液从上向下运动的话,那么产于大村铜矿中的这种分带正好相反,代表了含铜溶液是从下向上运动的。而产于砂岩中的沿层分带矿化则代表含铜溶液是从紫色砂岩向浅色层一方运动的。

### 1.4 矿石组构

代表矿岩成因的矿石组构主要为浸染状、条带状构造,在郝家河矿还见矿化受泄水构造控制,泄水构造以碟状构造为主,下部粉砂质泥岩在成岩期向上运动,形成不平整的地层接触界线,下部为紫色层,上部为浅色层,在其界线上常见斑点状的辉铜矿

集合体。除泄水构造外,一些准同生变形构造控矿也常见,如在主矿体之下形成泪滴状矿体,即由重力作用形成的同生枕状构造或球状构造。在大村还见结核状构造,结核由黄铁矿、黄铜矿和斑铜矿组成。

### 1.5 浅色层及其与成矿的关系

区内铜矿体均分布在红色砂岩中的浅色层内,特别是浅紫交界处。浅色层有原生与成岩两种成因。原生成因的浅色层产于大村段,由黑色—灰色的砂页岩组成,并含沥青质页岩,形成于一种封闭的还原环境,构成固定还原剂。成岩成因的浅色层分布广泛,是成岩阶段含硫及有机质的卤水(即活动还原剂)活动迁移,使地层中三价铁还原成二价铁形成的。种种现象表明,含矿层下部,特别是三叠系煤层中的有机质具有向上迁移的倾向,并改造紫色层为浅色层,表现在大多数浅色层分布在背斜核部及两翼附近。

## 2 成矿溶液的古水文特征

前面在讨论矿物分带和浅色体的形成时分别提

到了两种溶液,即含铜含氧的溶液和含硫含有机质的溶液,这两种溶液分别形成于不同的方式。

### 2.1 氧化含铜卤水的形成

氧化含铜卤水形成于上部层位,包括向下淋滤的大气降水和富  $\text{Cl}^-$  的孔隙水,区内的紫色泥岩是重要层位,在成矿中起重要作用。盆地内几个重要含矿层下都存在一个厚层的紫色泥岩,如妥甸组 and 普昌河组,而它们有比含矿层更高的铜丰度(分别为  $26.69 \times 10^{-6}$  和  $31.36 \times 10^{-6}$ )。而其上的两个含矿层高峰寺组和马头山组的铜丰度分别为  $20.81 \times 10^{-6}$  和  $21.51 \times 10^{-6}$ 。氧化含铜卤水的形成包括两个阶段,沉积物在沉积后,其间的水溶液由于蒸发作用使盐度增高,当这些溶液下降的时候,将与周围岩石发生两种反应,一是与膏盐反应,从中获得  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等离子,从而形成高盐度卤水。二是与红层反应,将获取其中的金属元素。红层的化学成分和渗透性适合于贱金属的溶解和搬运,据 Brown 研究,在  $25^\circ\text{C}$ ,  $0.5 \text{ mol}$  氯化物的低温水溶液中铜的溶解度可达  $(1 \sim 100) \times 10^{-6}$ ,铜与氯结合形成铜的氯络合物。根据包体组分研究,区内砂岩铜矿成岩成矿卤水为  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$  型,盐度达  $3.5 \sim 9.5 \text{ NaCl}$  的质量百分数,具封闭盆地卤水的特征。卤水在下降过程中通过与围岩反应使其含较丰富的  $\text{CuCl}$ 、 $\text{CuCl}_2^-$ 、 $\text{CuCl}_3^-$ 、 $\text{CuCl}^+$ 、 $\text{FeCl}_2$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等成分。

### 2.2 下部活动还原卤水的形成

还原卤水类似于循环卤水,其活动的主要位置在含矿层的下部,可能是沿断层(如生长断层)向下渗透的地下水与下部存在(如煤层析出)或上升的有机质气体混合形成。关于区内卤水沿断裂带运移,李雷和韩润生等都曾作过讨论。从图 1 所示的矿床分布反映出,砂岩铜矿明显受两条断裂带控制,而沿断裂分布的大小大小 10 多个浅色体也指示热液活动的痕迹。在这一过程中地下水所含  $\text{SO}_4^{2-}$  将被细菌还原成  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{O}_2$  被消耗掉而成为还原溶液,其成分主要为  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{S}^{2-}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 。

### 2.3 双重卤水结构模式

根据前面分析,存在两种形式的成矿卤水:一是上部的氧化含矿卤水,二是下部的还原卤水。区内矿物分带表明,沿矿物分带方向,在赤铁矿、辉铜矿一侧为氧、铜的来源方向,远离红层,其氧和铜含量

逐渐降低。靠浅色层一侧为铁和硫的来源方向,远离浅色层,含量逐渐降低。这两种来自不同方向的卤水共同构成双重卤水结构。两层卤水迁移的方向不同,其动力条件也不同。上部含矿卤水在上覆压力作用下具承压水的性质向低压区运动,其趋势是由下向上运动,由低透水层向高透水层流动,决定了本区卤水顺背斜两翼向上运动及从下部的紫色泥岩层向上部的透水性好的砂岩层运动,如果上部有泥岩存在,这种不透水层起屏蔽的作用,卤水将储集在其下的含水性较好的中细砂岩中。但砂岩不发育的地段,如大村段,其上部泥岩含钙质粉砂质成分,性质较活泼,本身有利于成矿,但由于其较差的透水性决定了只能形成薄层状矿体。来自下部层位的卤水,主要是靠构造应力(特别是挤压应力)作用,沿背斜轴部向上迁移。当卤水运移到背斜轴部时,如果受到上部不透水层的阻挡,将停下来,在重力作用下沿两翼顺层向下运动。这样就形成了两个不同运动方向的卤水。

## 3 矿床成因及成矿机理

对滇中砂岩铜矿的成因认识主要有 3 种观点:一是沉积-改造成因,二是成岩后生成因,三是热卤水对流成矿。本区除郝家河矿床后期改造作用较明显外,其他矿床改造作用非常弱,对成矿的贡献甚微。不论是后生成矿还是后生改造成矿,都不能解释这样的事实:如区内几个主要含矿层位铜的丰度值都不高,而丰度高的几个层位却几乎不含矿。同样,含矿层中的有机质平均含量也较低。也就是说含矿层不论是作为矿源层还是作为一种地球化学障都不够条件。另外作为后生热液为什么不沿透水性好的不整合面及砾岩层成矿,而是形成于中到细砂岩中,也无法解释。而在大范围内,成矿作用局限在特定的层位中,矿体呈似层状、透镜状沿层产出,矿石以条纹状、浸染状构造为主,并见矿化受成岩期泄水构造、准同生变形构造的控制等均表明主矿化是在成岩期形成的。辉铜矿是区内的主要矿石矿物,早期辉铜矿呈浸染状分布于砂岩碎屑之间,一般形成于胶结物与碎屑之间,有的见于石英等生长边内侧,说明这类辉铜矿形成早于次生石英而晚于胶结物形成,第 2 期辉铜矿产于成岩成熟期的次生裂隙中。有充分的证据表明在成岩期间,下部岩石中的孔隙水或封存水具有向上迁移的特征,这一过程中铜质也向上转移。在六苴苍蒲塘沟剖面上,六苴下

亚段底部粗碎屑岩中几乎不见胶结物,岩石具有明显被淋蚀的痕迹,向上胶结物含量增高。这种现象是由于成岩过程中的底蚀作用造成的。根据铅同位素资料分析,来自六直和郝家河矿的矿石铅的3个源区特征值均与围岩的值一致,暗示金属来自围岩。这也可从稀土元素特征得到证明,对采自六直矿床六直下亚段的浅色含矿岩石和上部的紫色岩石作稀土分析,并用赫尔曼的22个球粒陨石平均值标准化作稀土配分图(见图3),其中轻稀土明显富集,所有稀土配分曲线大致平行,说明岩石从下向上分异不明显,含矿与非含矿岩石的配分型式相似,反映成矿物质来自围岩。紫色层稀土总量高于浅色层,可能代表浅色层在形成过程中有稀土带出。采自六直和郝家河矿床的29个硫化物矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $-24.79\text{‰} \sim -1.70\text{‰}$ ,具生物硫特征,是厌氧细菌还原硫酸盐形成的。种种事实再结合前面的矿床地质特征和物质来源分析,有理由认为本区主要矿化在成岩期业已形成。在构造发育的地区,如郝家河地区,在后生阶段,形成了后生叠加的矿化。

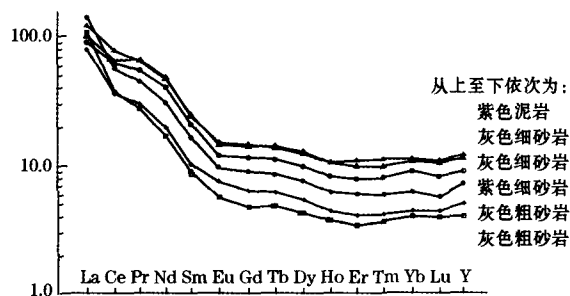


图3 六直铜矿围岩及矿石稀土配分模式

成岩期间,上覆沉积物逐渐变厚,下部疏松的沉积物在上覆沉积压力作用下压缩,使原来封存在沉积物孔隙中的卤水排出,形成同生含 $\text{CuCl}$ 、 $\text{CuCl}_2^-$ 、 $\text{CuCl}_3^{2-}$ 、 $\text{FeCl}^+$ 、 $\text{FeCl}_2$ 的矿化卤水沿背斜缓倾斜翼向上运动。与此同时,来自下部的含活动还原剂的卤水在构造作用下向处于低应力区的背斜轴部运动,在受到上部不透水层的阻挡时,溶液在重力作用下,顺层向下运动,这两种相反方向运移的卤水,最终将在应力中和面相遇,在这里两种溶液将发生反应,地层中的 $\text{Fe}^{3+}$ 被还原成 $\text{FeS}_2$ ,首先沉淀出黄铁矿,紫色层发生褪色形成浅色层。这一过程持续一段时间后,由于溶液中 $\text{Fe}^{2+}$ 减少,pH值开始上升, $\text{H}_2\text{S}$ 还原 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的能力开始减弱,开始被 $\text{CuCl}$ 、 $\text{CuCl}_2^-$ 等离子交代形成黄铜矿。黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿也可以通过两种溶液相互反应直接形成。实

际上整个反应过程应看成一个化学反应体系,体系中形成什么物质,溶解什么物质取决于 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^+$ 、 $\text{H}^+$ 、 $\text{O}^{2-}$ 等的含量,这才是形成矿物分带的主要原因,这一过程可用图4表示。

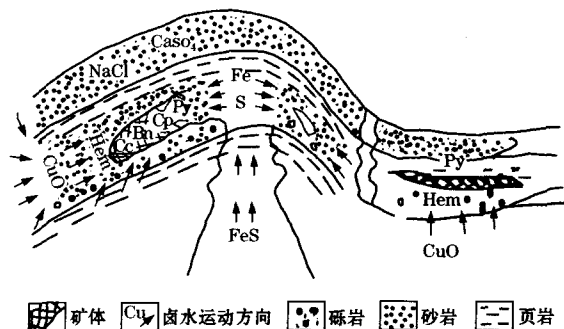


图4 滇中砂岩铜矿成矿模式

Cc—辉铜矿 Bn—斑铜矿 Cp—黄铜矿 Py—黄铁矿  
Hem—赤铁矿

在矿化定位的过程中,地形条件和褶皱构造对容矿场所和矿体形态都有一定影响,如果地层平缓,由于含矿溶液主要在垂直方向上运移,两种成矿溶液的中和面平行于地层层面,因此形成的浅色层和矿体也基本上平行地层层面,矿物分带呈纵向分带,如大村铜矿。当褶皱构造发育时,两个相向运动的卤水在背斜缓倾斜一翼相遇形成透镜状矿体。当下降流体占优势时,靠近紫色层一侧形成包卷前锋“鱼头”状,也出现分支尖灭,而在另一端形成雁尾状。当沿层上升卤水占优时,矿体也可在下端形成雁尾状。在后生期,由于受燕山末期—喜山早期(约700~800 Ma)的构造活动影响,一些地区发育断裂构造,打破了原来的物质平衡体系,在郝家河一带形成对流含矿卤水,这些卤水在上升过程中,与原来的矿体作用形成叠加富矿体。

致谢:刘星教授给予本文精心指导、薛传东副教授大力协助,在此表示衷心的感谢。同时,还要感谢致力于滇中砂岩铜矿床研究的老一届地质前辈、地质专家们。

#### 参考文献:

- [1] 冉崇英,庄汉平. 楚雄盆地铜、盐、有机矿床组合地球化学[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [2] 冉崇英,刘卫华,何明勤,等. 康滇地轴铜矿床地球化学层楼结构机理[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [3] 韩润生,胡熠昭,等. 云南省大姚县六直铜矿区小河—石门坎矿段接替资源勘查第一阶段、第二阶段、第三阶段成果[R]. 昆明:昆明理工大学,2005,2006.

作者简介:郭学兵(1973—),男,工程师,从事矿山勘查工作。